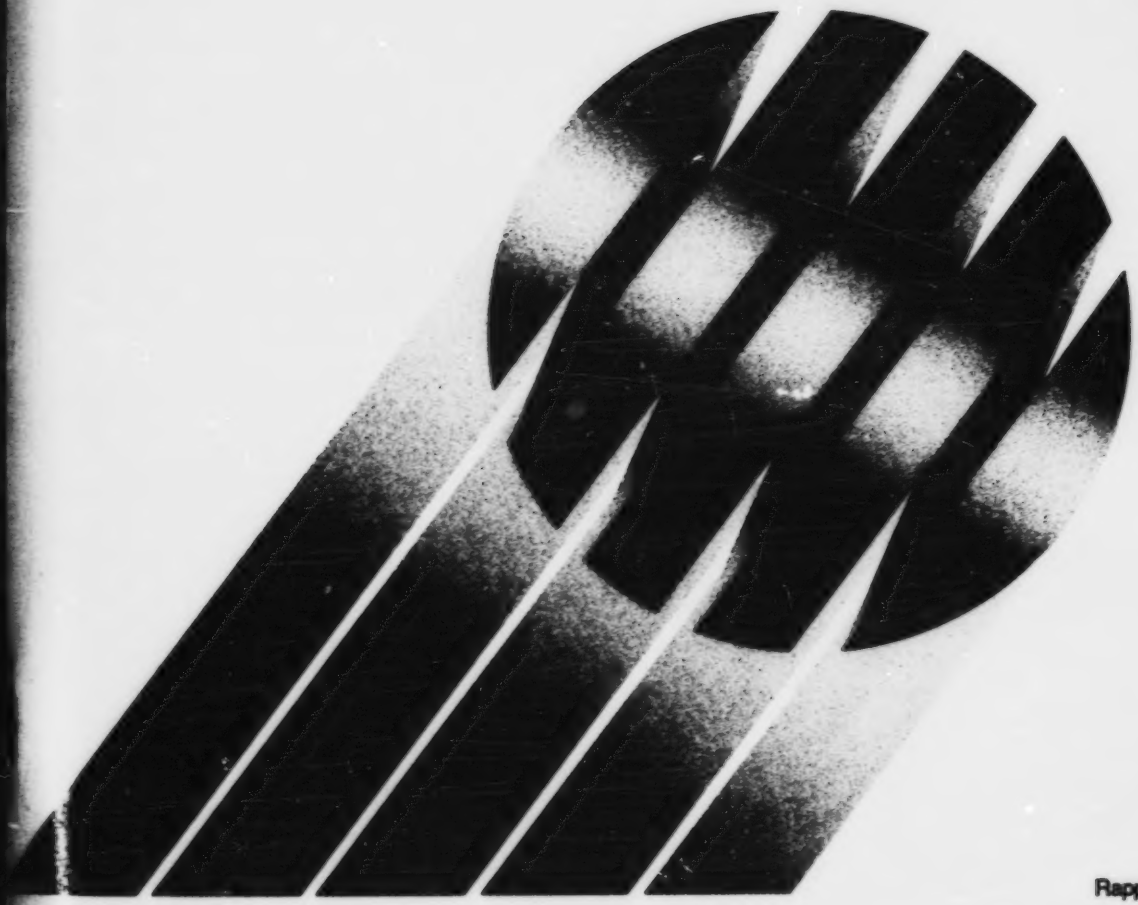
CANMET

Canada Centre for Mineral and Energy Technology

Centre canadien de la technologie des minéraux et de l'énergie

Techniques d'injection directe de charbon dans les hauts fourneaux

W.P. Hutny et J.T. Price
Laboratoire de recherche sur la combustion et la carbonisation



Rapport de CANMET 87-6F

Energy, Mines and Resources Canada
Énergie, Mines et Ressources Canada

Canada

THE ENERGY OF OUR RESOURCES · THE POWER OF OUR IDEAS

L'ÉNERGIE DE NOS RESSOURCES · NOTRE FORCE CRÉATRICE

TECHNIQUES D'INJECTION DIRECTE DE CHARBON DANS LES HAUTS FOURNEAUX

W.P. HUTNY ET J.T. PRICE
Laboratoire de recherche sur la combustion et la carbonisation

LABORATOIRES DE RECHERCHE SUR L'ÉNERGIE
RAPPORT DE CANMET 87-6F

Août 1987

110 pp

MICROMEDIA

91-05456/

© Ministre des Approvisionnements et Services Canada 1989

En vente au Canada par l'entremise des

librairies associées
et autres librairies

ou par la poste au :

Centre d'édition du gouvernement du Canada
Approvisionnements et Services Canada
Ottawa, Canada, K1A 0S9

N° de catalogue : M38-13/87-6F
ISBN 0-660-13149-8

TECHNIQUES D'INJECTION DIRECTE DE CHARBON DANS LES HAUTS FOURNEAUX

W.P. Hutny* et J.T. Price*

Résumé

Cette étude a été réalisée dans le but de vérifier les procédés entourant l'injection du charbon dans les hauts fourneaux. Elle visait également à déterminer dans quelle mesure cette technique est applicable aux charbons canadiens. Le rapport fait état des recherches et données opérationnelles découlant de plusieurs travaux effectués par des entreprises industrielles.

Les éléments qui influent sur l'injection de charbon, en particulier les caractéristiques du charbon, la combustion et les systèmes mécaniques de même que les aspects pratiques et théoriques sont passés en revue. Les auteurs présentent une étude des critères d'évaluation qui reposent sur la teneur en cendre et en matière volatile du charbon et proposent une méthode de rechange basée sur la caractérisation complète des produits résultant de la pyrolyse. L'étude a permis de conclure que plusieurs charbons canadiens de différentes classes peuvent être injectés directement dans les hauts fourneaux.

On recommande de poursuivre les recherches.

*Chercheur scientifique, Laboratoire de recherche sur la combustion et la carbonisation, Laboratoires de recherche sur l'énergie, CANMET, Énergie, Mines et Ressources Canada, Ottawa, K1A 0G1.

DIRECT USE OF COAL IN BLAST-FURNACE TECHNOLOGY

W.P. Hutny* and J.T. Price*

Abstract

This study was undertaken to investigate processes involving coal injection into blast furnaces and to assess the suitability of Canadian coals for this technology. Investigations and operating data from several industrial works are reported.

This paper discusses factors influencing coal injection, particularly coal characteristics, coal combustion, and mechanical systems. Both theoretical and practical aspects have been considered. Criteria for assessing coal based on volatile matter content and ash are discussed and an alternative method is proposed based on a complete characterization of pyrolysis products. The suitability of several Canadian coals for blast-furnace injection has been recognized.

Future research needs are identified.

*Research Scientist, Combustion and Carbonization Research Laboratory, Energy Research Laboratories, CANMET, Energy, Mines and Resources Canada, Ottawa, K1A 0G1.

TABLE DES MATIÈRES

RÉSUMÉ i
ABSTRACT iii
INTRODUCTION 1
Importance de l'injection de charbon 1
Historique 2
Objectifs 3
APERÇU DES RÉACTIONS DANS LES HAUTS FOURNEAUX 3
Bilan matière 3
Considérations thermiques 3
Réactions de réduction 6
Réduction indirecte 8
Régénération du monoxyde de carbone 8
Réduction directe 8
Fonctionnement au coke seulement 8
PRINCIPES DE L'INJECTION DE CHARBON 9
Systèmes mécaniques 9
Combustion 9
Modification chimique des réactions du haut fourneau 10
Modification thermique des réactions du haut fourneau 13
Taux d'injection du charbon 13
Rapport de remplacement 17
Influence de l'injection de charbon sur la qualité du coke requis 19
SYSTÈMES MÉCANIQUES 22
Considérations générales 22
Système Petrocarb 23
Modifications du système Petrocarb 23
Système Kawasaki 27
Système ARMCO–Babcock & Wilcox 27
Système Koppers 27
Injection Klockner 33
Système ARBED–Wurth 33
Système Macawber–British Steel Corporation 33
Système chinois 36
Systèmes soviétiques 36
Conclusion 36
CARACTÉRISTIQUES DU COKE INFLUANT SUR L'INJECTION 42
Classification des charbons 42
Caractéristiques des charbons 42
Effet de l'hydrogène 42
Effet des matières volatiles 43

Effet des cendres 43
Effet du soufre 45
Effet de l'humidité 47
Effet des alcalis 47
Effet de la facilité de broyage 47
Effet de la granulométrie 47
Résumé 49
COMBUSTION DU CHARBON 50
Généralités 50
Représentation physique 50
Facteurs influant sur l'efficacité de la combustion 54
Emplacement de la lance d'injection 54
Type de charbon 56
Rapport stoechiométrique/taux d'injection 59
Paramètres du vent (température, pression, taux d'oxygène) 59
Granulométrie 59
Composition macérale 63
Modèles mathématiques 63
Sommaire 64
NOUVEAUX ASPECTS DE L'ÉVALUATION DES CHARBONS POUR L'INJECTION .. 64
Combustion, formation de goudrons et de suie 65
Conclusions et recommandations 68
ÉVALUATION DES CHARBONS CANADIENS POUR L'INJECTION 70
Anthracite 70
Charbons bitumineux 71
Charbons sous-bitumineux 72
Lignites 72
FACTEURS FAVORISANT L'INJECTION, CONCLUSIONS, ANALYSE DES COÛTS ... 73
BESOINS DE RECHERCHE 78
Modélisation informatique et simulation du processus 78
Caractéristiques de la combustion du charbon 79
Combustion des charbons granulaires et pulvérisés 80
Comportement du coke pendant l'injection de charbon 80
Caractéristiques de combustion des charbons canadiens 81
RÉFÉRENCES 82
ANNEXE A – DONNÉES (ANALYSE DES CHARBONS ET HAUTS FOURNEAUX) ... 93

TABLEAUX

1. Types de charbons utilisés pour l'injection dans les hauts fourneaux 44
2. Relation entre le rang du charbon et le rapport C/H 44

3. Relation entre le rapport de remplacement et le type de charbon 46
4. Produits apparents de la pyrolyse rapide à 1 027°C 52
5. Rendement en produits de pyrolyse des charbons canadiens (essai de Fischer) 52
6. Conditions expérimentales 60
7. Économies par tonne de fonte lorsque l'injection de charbon remplace le coke 75
8. Économies par tonne de fonte lorsque l'injection de charbon remplace l'injection de pétrole 75
A-1. Différences entre les systèmes d'injection de charbon Amanda et Bellefonte (ARMCO-Babcock & Wilcox) 95
A-2. Production et exportation de charbons canadiens (1985, 1986) 95
A-3. Caractéristiques de l'anthracite canadien 96
A-4. Caractéristiques des charbons bitumineux canadiens 96
A-5. Caractéristiques des charbons sous-bitumineux canadiens 97
A-6. Caractéristiques des lignites canadiens 98
A-7. Données sur l'utilisation de l'injection de charbon 99

FIGURES

1. Bilan matière dans un haut fourneau de grande dimension 4
2. Structure interne d'un haut fourneau de grande dimension 5
3. Forme de la zone de combustion 5
4. Effet de la température et de l'humidité du vent sur la TRAC 7
5. Diagramme des températures dans un haut fourneau 7
6. Zone de combustion d'un haut fourneau 9
7. Facteurs influants sur la combustion du charbon dans un haut fourneau 11
8. Changements de composition des gaz en avant de la tuyère (haut fourneau n° 2, Chiba, Japon) 12
9. Relation entre la consommation d'oxygène et le taux d'injection de charbon 14
10. Effet de l'apport d'hydrogène sur le processus de réduction (haut fourneau n° 1, Oita, Japon) 14
11. Relation entre l'apport d'hydrogène et la réaction de régénération du CO 15
12. Relation entre la production de fonte et la TRAC 15
13. Effet de l'injection de combustible de remplacement sur la TRAC 15
14. Variations de la TRAC et de la consommation de coke avec le taux d'injection 16
15. Taux d'injection de combustible de remplacement permis par rapport au pétrole à une TRAC constante 16
16. Relation entre le taux d'ICP et la TRAC (haut fourneau n° 1, Oita, Japon) 18
17. Influence du taux d'ICP sur le profil des températures (haut fourneau n° 3, Kobe, Japon) 18
18. Rapport de remplacement en fonction du C/H du charbon 20
19. Taux de remplacement du coke par unité de masse de combustible injecté 20
20. Taux total de remplacement du coke permis par rapport au pétrole, à une TRAC constante 21

21. Variation du rapport de remplacement avec la TRAC 21
22. Diagramme du système Petrocarb d'injection de charbon (haut fourneau n° 3, Kobe, Japon) 24
23. Sous- ;tème Petrocarb de distribution et d'injection 25
24. Système modifié (Kobe–Petrocarb) de commande d'injection 26
25. Sous–système de distribution et d'injection du système polyvalent Kawasaki 28
26. Diagramme du système polyvalent Kawasaki (haut fourneau n° 5, Chiba, Japon) 28
27. Diagramme de commande de l'injection des poudres (Kawasaki Steel Corporation) ... 29
28. Diagramme du système ARMCO–Babcock & Wilcox (Amanda) 29
29. Sous–système de distribution et d'injection du système ARMCO–Babcock & Wilcox (Amanda) 30
30. Préparation, distribution et injection du charbon aux aciéries Hoogovens Ijmuiden 30
31. Sous–système de distribution et d'injection aux aciéries Hoogovens Ijmuiden 31
32. Distribution ciculaire du charbon aux aciéries Hoogovens Ijmuiden 32
33. Système Koppers 32
34. Pompe d'alimentation en charbon 34
35. Trois versions du système Klockner 34
36. Système ARBED–Wurth 35
37. Système d'injection de la British Steel Corporation 37
38. Système chinois de préparation, de distribution et d'injection du charbon 37
39. Sous–système d'injection chinois 38
40. Système Doneck d'injection de charbon pulvérisé 39
41. Système Karaganda d'injection de charbon pulvérisé 40
42. Système Zaporozstal d'injection de charbon pulvérisé 41
43. Relation optimale entre la quantité de combustible injecté et le rapport C/H 44
44. Rapport de remplacement en fonction de la teneur en cendres 46
45. Humidité de constitution d'un charbon en fonction de l'humidité de son produit pulvérisé 48
46. Relation entre l'indice de broyage Hardgrove et la teneur en matières volatiles 48
47. Représentation physique de la combustion du charbon 51
48. Courbes typiques de dégagement des matières volatiles pour un charbon à haute teneur à différents taux de chauffage 53
49. Rapport C/H en fonction de la fraction pyrolysée 53
50. Température superficielle en fonction du temps, de la température du vent et du diamètre des particules 55
51. Relation entre la fraction combustible des matières volatiles et la température d'inflammation 55
52. Effet de l'emplacement de la lance d'injection sur l'efficacité de la combustion et le dépôt de cendres 57
53. Relation entre le type de combustible et l'efficacité de la combustion 57
54. Variation des paramètres de combustion avec le combustible injecté 58
55. Efficacité de la combustion en fonction du taux d'injection de charbon 60
56. Relation entre la teneur du vent en oxygène et l'efficacité de la combustion 61

57. Efficacité de la combustion en fonction de la température du vent 61
58. Efficacité de la combustion en fonction de la pression du vent 62
59. Relation entre l'efficacité de la combustion et la granulométrie 62
60. Caractéristiques de combustion de charbons à moyenne et haute teneur en matières volatiles 66
61. Influence du type de charbon sur la production de goudrons (essai de Fischer) 67
62. Produits de pyrolyse en fonction de la teneur en matière volatiles (d'après l'analyse immédiate) 67
63. Effet du taux de charbon injecté sur l'efficacité de la combustion pour deux types de charbon ayant des teneurs différentes en matières volatiles 69
64. Effet de la teneur en matières volatiles sur le taux d'injection et la productivité 71
65. Évolution du taux de combustible en France 76
66. Économies résultant du remplacement du coke par du charbon 77
67. Économies résultant du remplacement du pétrole par du charbon 77

INTRODUCTION

IMPORTANCE DE L'INJECTION DE CHARBON

Après une longue évolution, le fonctionnement des hauts fourneaux a connu, ces dernières décennies, des changements considérables se traduisant par une amélioration de la productivité et une diminution de la consommation de coke. Ces améliorations ont été rendues possibles par de nouvelles technologies comme l'élévation de la température, l'augmentation de la pression au sommet, l'enrichissement en oxygène, l'amélioration du coke et une meilleure préparation du lit de fusion. Un autre facteur qui a modifié considérablement le processus est l'injection de combustible de remplacement par les tuyères, méthode qui fait maintenant partie de la technologie d'élaboration de la fonte. L'injection de combustible de remplacement diminue la consommation de coke et provoque des réactions endothermiques qui permettent de réguler le bilan énergétique dans la zone de combustion, assurant ainsi un fonctionnement régulier et efficace.

L'utilisation d'un combustible de remplacement diminue la consommation de coke par apport direct de carbone et permet un fonctionnement à plus haute température. L'injection de combustible de remplacement se pratique maintenant depuis plus de 20 ans.

L'utilisation de combustibles de remplacement du coke dépend :

- des avantages économiques de chaque combustible;
- d'une technologie appropriée;
- des approvisionnements en combustible; et
- des immobilisations requises.

C'est ainsi que l'on a utilisé du gaz naturel, des gaz de fours à coke, des goudrons, des pétroles et des charbons comme combustibles de remplacement. Presque tous ces combustibles ont des avantages par rapport au coke, même si le pétrole a été le plus utilisé.

Ces dernières années, le prix et la disponibilité des diverses sources d'énergie ont varié considérablement et la rentabilité de l'injection de pétrole et de gaz est maintenant en question. À titre d'exemple, au Japon en 1981, 32 des 44 hauts fourneaux ont été convertis pour utiliser du coke uniquement et en 1983 il n'y en avait plus aucun qui utilisait du pétrole (1). La tendance est la même dans d'autres pays.

Il est bon de noter que, dans le monde entier, beaucoup de hauts fourneaux ont été conçus avec des tuyères d'injection. La suppression de l'injection de combustible a causé toutes sortes de problèmes et conduit à de la fonte de moins bonne qualité, à un taux de production inférieur et à une augmentation de la consommation de coke. L'instabilité des prix du pétrole et l'épuisement des réserves (que l'on estime suffisantes pour 20 à 50 ans) (2, 3) ont forcé la sidérurgie à chercher d'autres combustibles de remplacement du coke. On a essayé avec des degrés de succès divers, des goudrons de houille, de l'huile de houille et des mélanges charbon–eau. Récemment, c'est l'injection de charbon pulvérisé ou granulaire qui a retenu le plus l'attention, et elle est utilisée dans des hauts fourneaux du monde entier.

L'injection de charbon pose des problèmes particuliers, exige des installations perfectionnées et entraîne donc des immobilisations élevées. Citons les facteurs suivants :

- problèmes de manutention;
- difficulté du transport aux tuyères pour être sûr d'avoir des conditions de combustion uniformes;
- combustibilité inférieure (par rapport au gaz naturel ou au pétrole);
- présence de matières minérales; et
- résidus imbrûlés modifiant l'écoulement des gaz et la perméabilité du lit.

Par contre, le charbon est souvent le combustible le meilleur marché, le plus abondant (réserves estimées à plus de 250 ans) (3) et le plus efficace pour remplacer le pétrole. Il présente un rapport élevé de remplacement du coke et a généralement tendance à améliorer le fonctionnement du haut fourneau.

Selon la documentation, 50 hauts fourneaux utiliseraient l'injection de charbon : 12 au Japon; 7 au Royaume-Uni; 5 aux États-Unis, en Allemagne de l'Ouest et en Chine; 4 en France; 3 en U.R.S.S.; 2 en Belgique et aux Pays-Bas; et 1 au Luxembourg, en Pologne, en Suède, en Allemagne de l'Est et en Australie (charbon de bois).

On prévoit une augmentation de l'utilisation de l'injection de charbon. Ainsi, au Japon, l'utilisation de charbon a augmenté de 70 % en 1985, passant de 13,2 kg par tonne de métal élaboré à 22,4 kg/t en 1986 (4).

HISTORIQUE

L'injection de charbon dans les hauts fourneaux n'est pas nouvelle. Les premières expériences ont été faites en France et en Belgique au milieu du XIX^{e} siècle. À cette époque, le charbon injecté représentait environ 10 % du combustible total. Le principe de l'injection de charbon pulvérisé (ICP) est réapparu en 1948 et 1955, avec la réalisation de quelques expériences en U.R.S.S. sur la réduction de la consommation de coke dans l'élaboration des ferrosiliciums (Aciéries Dzierzynski, U.R.S.S.) (5). En 1956, on injectait du charbon pulvérisé, à faible teneur en matières volatiles, dans un haut fourneau à ferromanganèse de 330 m^3 aux aciéries Novotula, en U.R.S.S. (6). Avec un enrichissement d'oxygène de 31 % et un taux d'injection de charbon de 189 kg par tonne de ferromanganèse, le rapport de remplacement du coke était de 1.

Aux États-Unis, la première expérience a eu lieu dans un haut fourneau du US Bureau of Mines, en 1959 (7). Un an plus tard, on faisait la première application commerciale à la National Steel, Hanna Furnace Division (8). À cette époque, des essais similaires étaient effectués à la Chasse (9, 10) et à Usinor, Louvroil (France), ainsi qu'à Stanton et Staveley (Angleterre) (11, 12). La Weirton Steel Corporation de la National Steel Corporation (É.-U.), introduisait l'ICP à ses hauts fourneaux n° 2 et n° 3 en 1962 et 1963, respectivement (13). L'application commerciale suivante a été faite aux États-Unis, en 1964, sur un haut fourneau de la Ashland Works d'ARMCO (14).

Dans les années 1960, la République populaire de Chine (15) a également commencé à utiliser l'ICP avec succès. C'est maintenant une méthode bien acceptée pour améliorer la performance des hauts fourneaux et elle a retenu l'intérêt de la sidérurgie dans le monde entier.

OBJECTIFS

Cette étude avait cinq objectifs :

- trouver tous les renseignements disponibles, tant théoriques qu'industriels, sur le procédé d'injection de charbon;
- faire une évaluation critique des avantages et des inconvénients des techniques d'injection de charbon;
- établir et évaluer les critères utilisés pour l'injection de charbon;
- évaluer la possibilité d'utiliser les charbons canadiens pour l'injection; et
- préparer une stratégie de nouveaux travaux pour évaluer les techniques d'injection de charbon dans le contexte canadien.

APERÇU DES RÉACTIONS DANS LES HAUTS FOURNEAUX

BILAN MATIÈRE

Le haut fourneau est un réacteur chimique à lit fluidisé, à haute température, dont la fonction est de produire efficacement une fonte de qualité donnée. Le minerai de fer, le coke et les fondants sont enfournés à la partie supérieure, tandis que l'air préchauffé, à une température de 900°C à 1 200°C, et les combustibles de remplacement sont injectés par des tuyères. Le monoxyde de carbone, l'hydrogène et l'azote qui s'échappent de la zone de combustion, qui sont à une température très élevée, transmettent une grande partie de leur chaleur utile à la charge descendante. La figure 1 (16) donne un exemple représentatif du bilan matière. L'examen de hauts fourneaux étouffés a permis de donner à un haut fourneau typique la structure montrée à la figure 2 (16).

CONSIDÉRATIONS THERMIQUES

On peut considérer le haut fourneau comme :

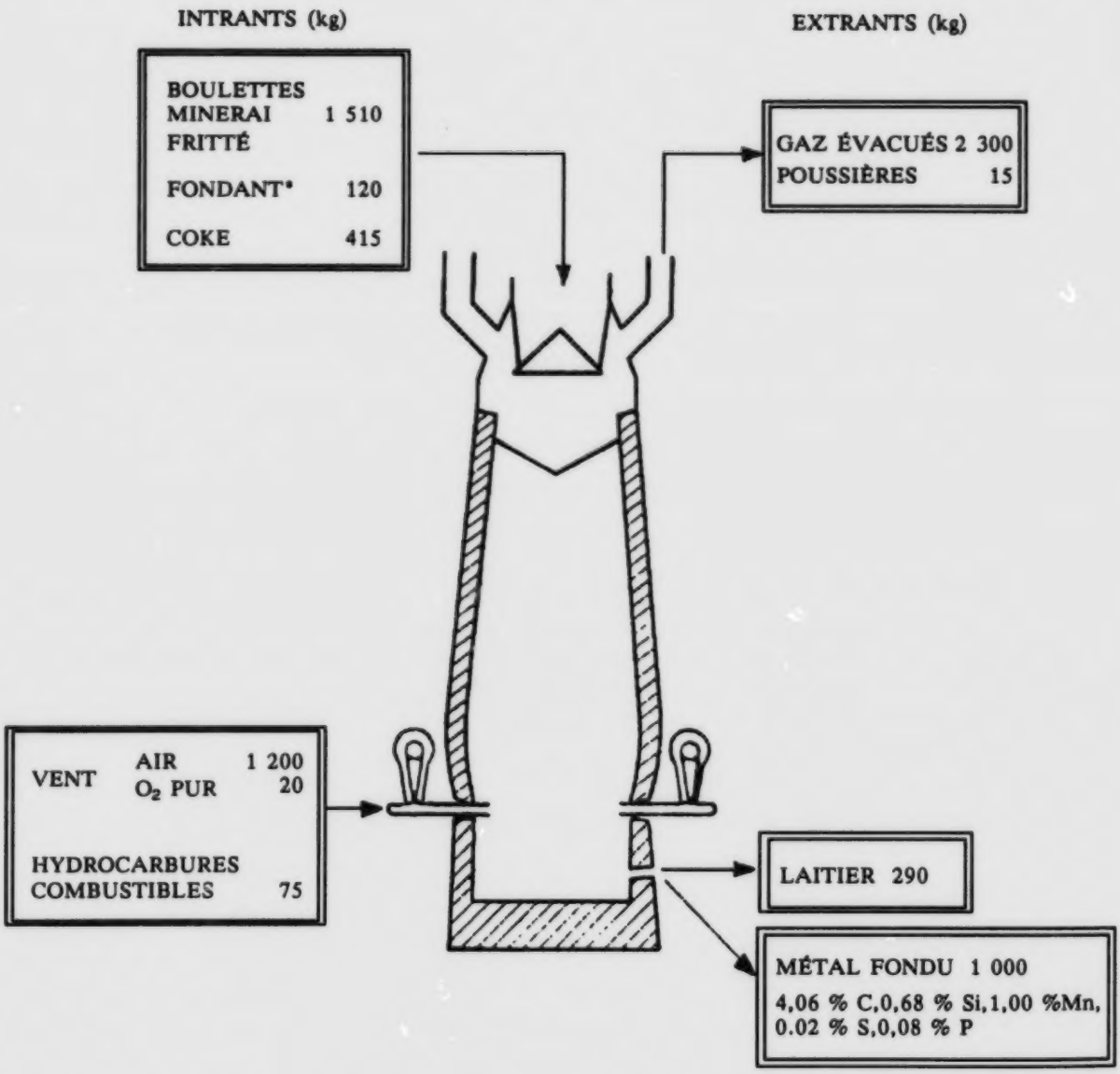
- un échangeur de chaleur (gaz-solides), à contre-courant, des tuyères à la gueule; et
- un échangeur d'oxygène à contre-courant, de la zone de fusion à la gueule (réduction indirecte).

Les gaz ascendants transmettent leur chaleur à la charge, provoquant échauffement, fusion et réactions endothermiques, ainsi que l'extraction de l'oxygène des oxydes.

La chaleur requise par le haut fourneau provient :

- de l'air chaud insufflé par les tuyères; et
- de la combustion du coke et des autres combustibles injectés.

La combustion s'effectue dans la zone créée par l'injection d'air chaud, à une vitesse de 150 à 250 m/s et sous une pression de 2 à 4 atm. Ce jet d'air (vent) forme à la sortie des tuyères un vide que l'on appelle la cavité et qui pénètre 1 m à 1,5 m à l'intérieur du haut fourneau. On estime que la combustion se produit dans les deux zones indiquées à la figure 3 (17).



Composition du laitier :

SiO_2	30–40 %	MgO	5–15 %
Al_2O_3	5–15 %	S	1–2,5 %
CaO	35–45 %	$NaO+K_2O$	0–1 %

Rapport de basicité du laitier $(CaO+MgO)/(SiO_2+Al_2O_3)$ = 1,1–1,2

Composition des gaz évacués : CO – 23 %, CO_2 – 22 %, H_2 – 3 %, H_2O – 3 %, N_2 – 49 %

Fig. 1 – Bilan matière dans un haut fourneau de grande dimension

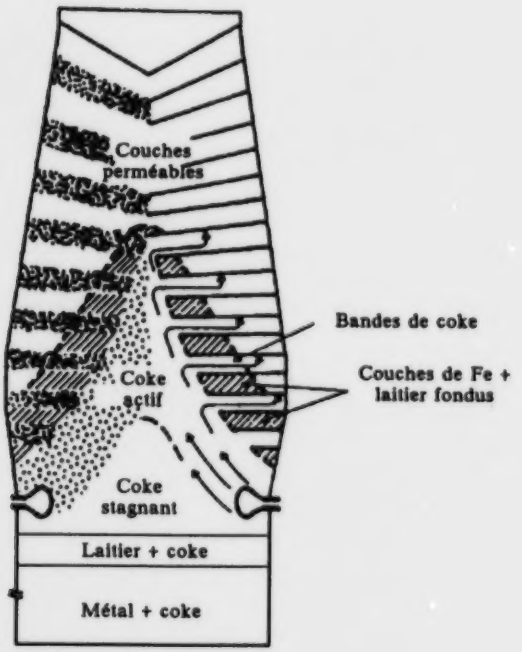


Fig. 2 – Structure interne d'un haut fourneau de grande dimension

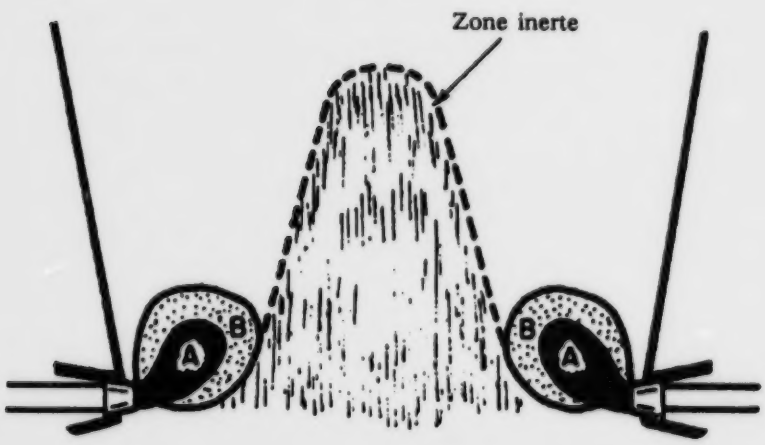


Fig. 3 – Forme de la zone de combustion

La combustion du carbone dans le haut fourneau (voir Fig. 3) peut être décrite par les réactions suivantes :

Zone A :	$C + O_2$	= CO_2	(exothermique	$\Delta H° = -94,05$ kcal)
Zone B :	$C + CO_2$	= 2CO	(endothermique	$\Delta H° = +41,21$ kcal)
Total :	$C + O_2$	= 2CO	(exothermique	$\Delta H° = -52,84$ kcal)

Il se produit d'autres réactions si l'air contient de l'humidité ou si le combustible injecté contient de l'hydrogène :

$H_2 + 1/2\ O_2$	= H_2O		(exothermique	$\Delta H° = -57,8$ kcal)
$C + H_2O$	= $CO + H_2$		(endothermique	$\Delta H° = +31,5$ kcal)
Total :			(exothermique	$\Delta H° = -26,3$ kcal)

Le régime thermique dans le haut fourneau est fonction de la température dans la zone de combustion, que l'on mesure de façon pratique par la température en régime adiabatique dans la cavité (TRAC). La TRAC dépend de la température du vent, de l'injection de combustible de remplacement et d'autres paramètres comme la teneur en oxygène et en eau. La TRAC peut être calculée à partir du bilan matière et du bilan thermique dans la zone de combustion du haut fourneau. Pour un haut fourneau et une composition de charge donnés, il y a une plage critique de conditions de fonctionnement qu'il faut respecter pour avoir un résultat satisfaisant, notamment :

- la limite supérieure de la TRAC;
- la limite inférieure de la TRAC; et
- la quantité minimale de gaz réducteurs.

Lorsque l'on dépasse la limite supérieure de la TRAC, la chaleur excessive entraîne la formation prématurée de laitier de $CaO–FeO–SiO_2$. Ensuite, la réduction du FeO élève le point de fusion du laitier et entraîne sa solidification. La perméabilité aux gaz de la charge s'en trouve réduite, ce qui a pour effet de nuire à l'efficacité des échanges de chaleur et à la descente des matières. Un autre effet est l'augmentation du taux de volatilisation des alcalis.

La limite inférieure de la TRAC est généralement celle qui correspond à la température minimum pour maintenir le métal en fusion dans le creuset du haut fourneau.

La TRAC augmente quand la température du vent s'élève (Fig. 4) (16), quand on l'enrichi en oxygène ou quand on diminue son humidité. La TRAC peut être réduite en augmentant l'humidité du vent ou en injectant un combustible de remplacement. Les deux interventions provoquent des réactions endothermiques qui refroidissent le haut fourneau. La figure 5 donne un exemple type de régime thermique des hauts fourneaux (16).

RÉACTIONS DE RÉDUCTION

Si on considère le haut fourneau comme un réacteur chimique, il faut mentionner l'importance de certaines réactions (17).

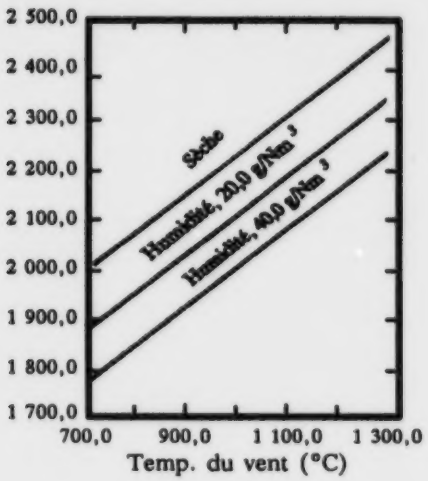


Fig. 4 – Effet de la température et de l'humidité du vent sur la TRAC

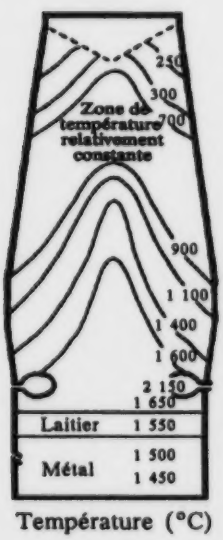


Fig. 5 – Diagramme des températures dans un haut fourneau

Réduction indirecte

À l'intérieur du haut fourneau, l'oxyde de fer est réduit par CO pour donner du fer et du CO_2 selon l'équation :

$$FeO + CO = Fe + CO_2 \quad \text{(exothermique)}$$

Par définition, il y a réduction indirecte lorsque le CO_2, produit de cette réaction, quitte le haut fourneau sans réagir de nouveau avec le carbone, ce qui se produit normalement au-dessous de 850-900°C.

Régénération du monoxyde de carbone

Cette réaction produit du CO par réaction du CO_2 avec le carbone (coke) au-dessus de 850-900°C; c'est une réaction très endothermique :

$$C + CO_2 = 2CO \quad \text{(endothermique)}$$

Réduction directe

À la partie inférieure du haut fourneau, à très haute température, il y a formation de fer et de monoxyde de carbone par réaction directe du carbone et de l'oxyde de fer :

$$FeO + C = Fe + CO \quad \text{(endothermique)}$$

L'analyse de ces équations montre que la réduction indirecte suivie de la réduction du dioxyde de carbone est, des points de vue chimique et thermodynamique, identique à la réduction directe par le carbone.

Il est avantageux, du point de vue thermique, d'avoir une réduction indirecte plutôt que directe, car la première est exothermique et diminue les besoins énergétiques du haut fourneau. On peut augmenter la réduction indirecte en ayant une charge de bonne granulométrie et bien mélangée, qui facilite la diffusion des gaz et de la chaleur dans la masse. Toutefois, les conditions d'équilibre pour une température donnée limitent la proportion de réduction indirecte que l'on peut obtenir. L'introduction d'hydrogène dans le haut fourneau déplace l'équilibre en faveur des réactions de réduction indirecte.

FONCTIONNEMENT AU COKE SEULEMENT

On reconnaît généralement, dans la pratique industrielle (18-20), que le fonctionnement au coke seulement est moins stable que le fonctionnement avec injection de combustible de remplacement. Lorsque l'on n'utilise que le coke, on peut avoir des difficultés à contrôler la température de la flamme, la teneur du métal en silicium, la distribution des températures et la descente de la charge, ce qui entraîne une réduction de la production et une augmentation de la consommation de combustible.

PRINCIPES DE L'INJECTION DE CHARBON

SYSTÈMES MÉCANIQUES

Pour utiliser l'injection de charbon dans les hauts fourneaux industriels, on a besoin des systèmes suivants :

- stockage et distribution du charbon brut;
- pulvérisation et séchage du charbon;
- transport, stockage et acheminement à l'injecteur du CP;
- sécurité et protection contre les explosions;
- distribution uniforme ou individualisée aux tuyères; et
- combustion du charbon pulvérisé.

Plusieurs systèmes mécaniques de broyage et de distribution du charbon ont été mis au point, mais on peut les diviser en deux catégories : alimentation pneumatique et alimentation mécanique.

Les systèmes Petrocarb, Babcock & Wilcox ainsi que chinois et soviétique utilisent la première et dépendent donc d'un acheminement pneumatique du charbon. Koppers a mis au point une alimentation mécanique dont l'élément principal est une pompe à charbon dont la vitesse règle le taux d'injection. Les systèmes d'injection et leurs applications sont décrits en détail au chapitre "Systèmes mécaniques".

COMBUSTION

Un apport uniforme de charbon à chacune des tuyères est particulièrement important si l'on veut un fonctionnement efficace du haut fourneau. Le charbon est injecté, par les tuyères, directement dans la cavité de la zone de combustion (Fig. 6) (21). Les particules de charbon qui sortent de la lance d'injection entrent dans le porte-vent où elles absorbent de la chaleur et commencent à libérer leurs matières volatiles et à brûler. Le processus qui commence dans le porte-vent se termine dans la zone de combustion.

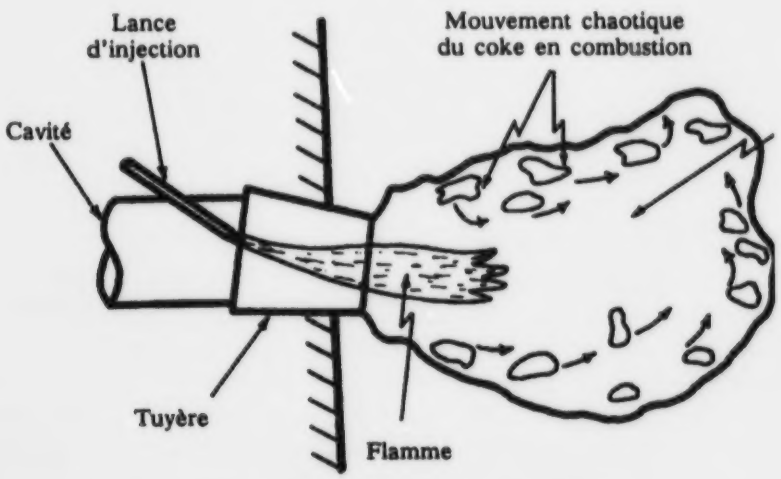


Fig. 6 – Zone de combustion d'un haut fourneau

Pour que le charbon injecté dans un haut fourneau brûle efficacement, il faut avoir recours à une technologie très efficace, car la durée de la combustion n'est que de quelques millisecondes et l'espace disponible très restreint. L'efficacité de la combustion du charbon dépend de trois facteurs que l'on montre à la figure 7 :

- les propriétés du charbon;
- les conditions de combustion; et
- la conception des dispositifs de combustion.

La durée de vie des porte-vent, des lances d'injection et des tuyères, ainsi que le dépôt de cendres à l'intérieur doivent être envisagés au moment de la conception, en même temps que les facteurs susceptibles d'optimiser l'efficacité de la combustion.

Pour avoir une bonne distribution des gaz et de la chaleur dans la masse du haut fourneau, ainsi que pour satisfaire les besoins thermiques de l'élaboration du métal, il importe que la combustion soit aussi complète que possible. Une combustion incomplète peut produire de la suie qui pourrait bloquer la cavité et diminuer la perméabilité de la charge. L'effet de l'injection de charbon sur le profil de composition des gaz dans la zone des tuyères d'un haut fourneau est indiqué à la figure 8 (18). Le point focal de la combustion, que l'on définit comme le point où la concentration de dioxyde de carbone est maximale, se rapproche de l'extrémité de la tuyère lorsque l'on augmente la quantité de charbon injectée.

MODIFICATION CHIMIQUE DES RÉACTIONS DU HAUT FOURNEAU

Le remplacement partiel du coke par du charbon injecté entraîne des changements considérables des conditions physiques et chimiques à l'intérieur du haut fourneau. Le charbon, en tant que combustible porteur d'hydrogène, change la composition et les propriétés du gaz des tuyères. Les données thermochimiques indiquent que l'hydrogène est un agent réducteur plus efficace que le monoxyde de carbone. La réaction de régénération de l'hydrogène à partir de l'eau et du carbone :

$$H_2O + C = CO + H_2$$

est moins endothermique et plus rapide que la réaction de régénération du monoxyde de carbone :

$$CO_2 + C = 2CO$$

Lorsque le taux d'injection de combustible de remplacement augmente, la quantité d'oxygène ultimement éliminée sous forme d'eau augmente aux dépens de la réduction directe par le carbone ou de la réduction associée à la régénération de CO (Fig. 9) (22). Donc, la réaction de régénération de l'hydrogène déplace la réaction de régénération de CO, ce qui diminue les besoins thermiques du processus. L'injection de charbon est donc, peut-être, plus intéressante encore que le simple remplacement d'une certaine quantité de carbone de coke par une quantité égale de carbone de charbon. Les systèmes C-O et C-O-H ont été envisagés plus haut.

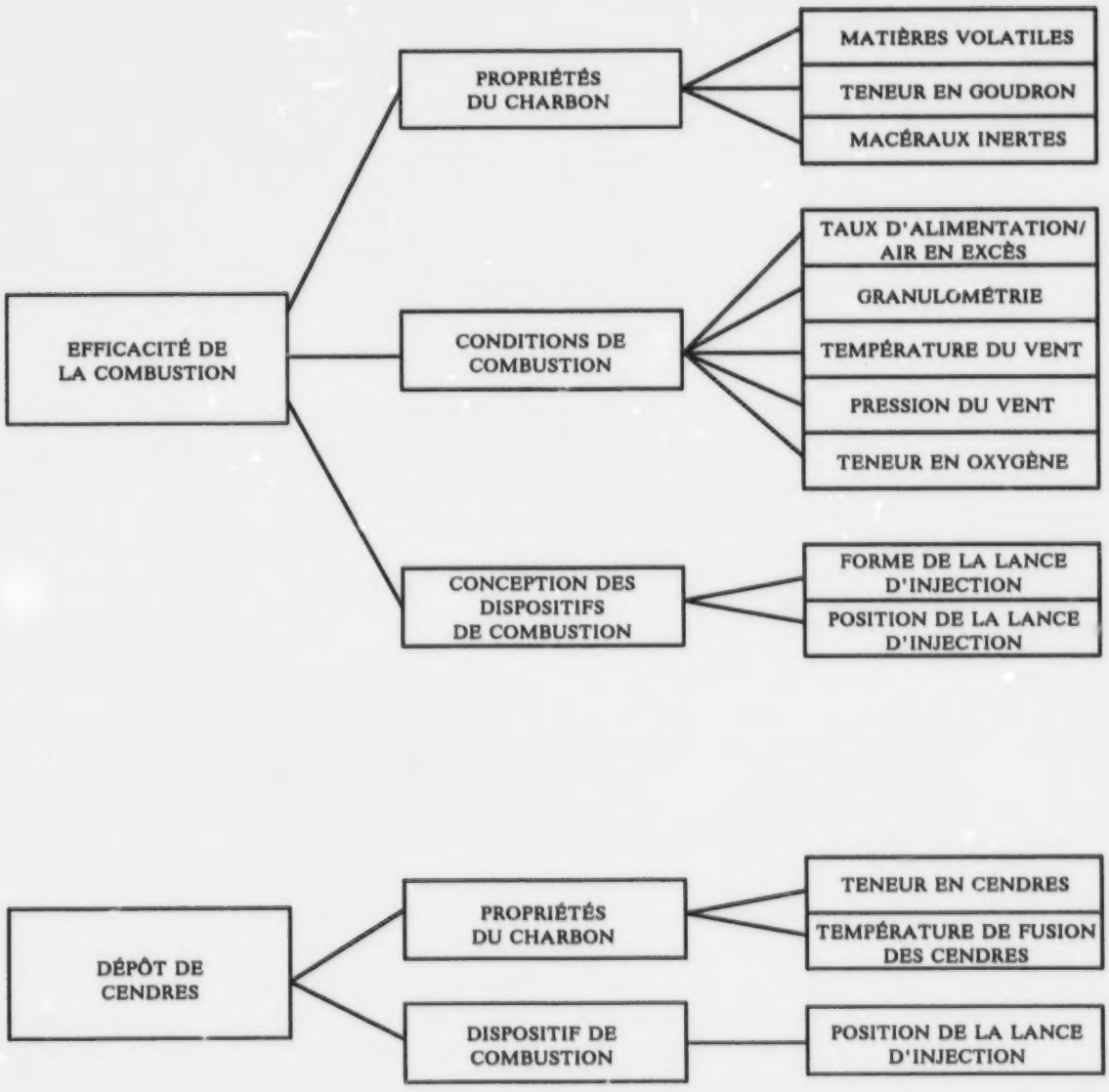
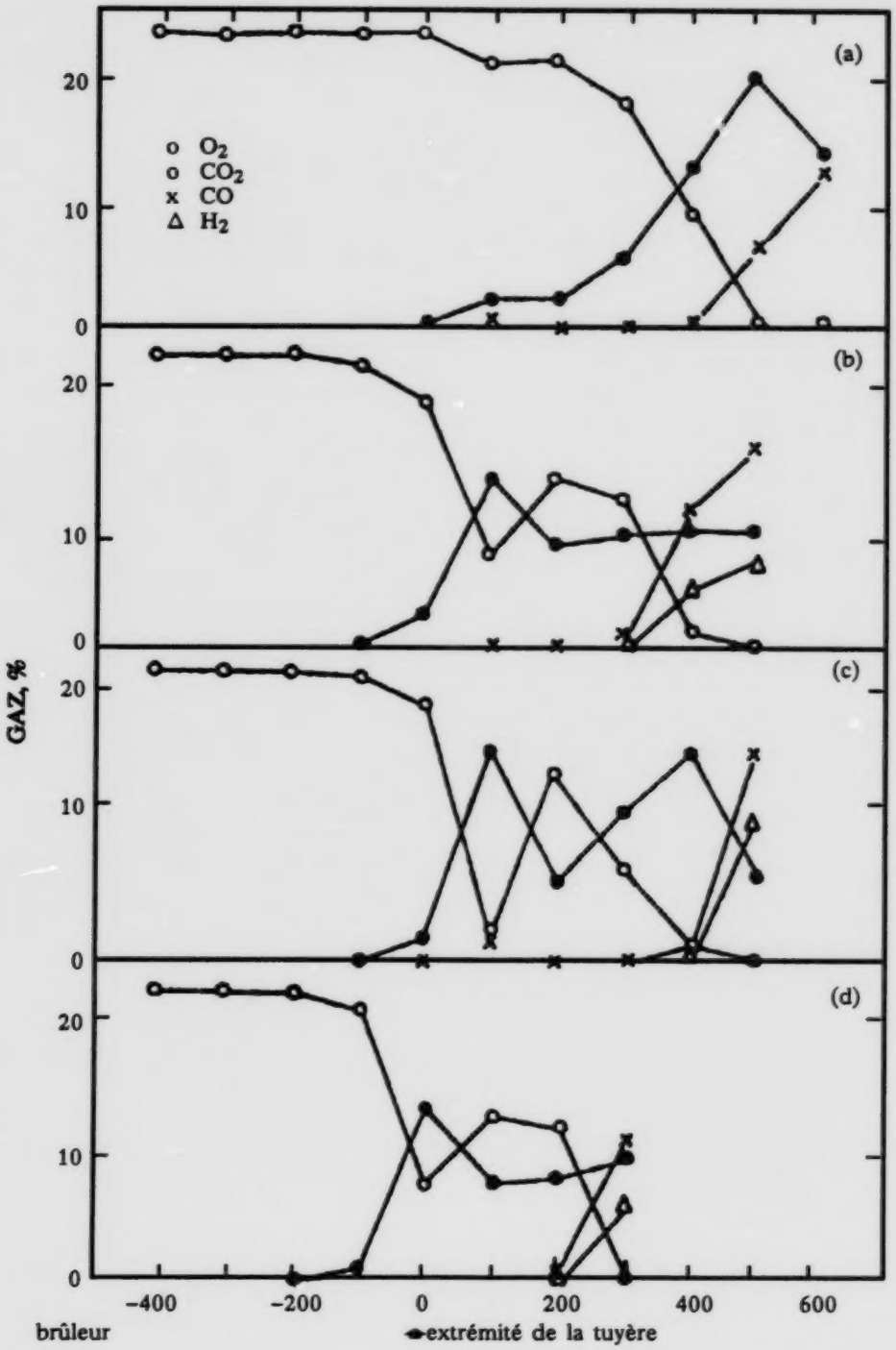


Fig. 7 – Facteurs influants sur la combustion du charbon dans un haut fourneau



a) pas d'injection; b) 200 kg/h^{-1}; c) 300 kg/h^{-1}; d) 400 kg/h^{-1}

Fig. 8 – Changements de composition des gaz en avant de la tuyère (haut fourneau n° 2, Chiba, Japon)

L'augmentation de la quantité d'hydrogène dans le haut fourneau entraîne des modifications du processus de réduction. Les conditions à l'intérieur du haut fourneau (type de réduction, importance de la régénération de CO, températures dans la zone de combustion et efficacités d'utilisation des gaz) sont comparées aux figures 10 et 11 (23) pour l'utilisation de coke seulement, l'injection de pétrole et l'injection de charbon. Cette comparaison montre que :

- c'est avec l'injection de charbon que la réduction indirecte est la plus forte (59 %) et la réduction directe la plus faible (34 %);
- la réduction indirecte et la réduction par l'hydrogène augmentent et la réduction directe diminue, lorsqu'on accroît l'apport d'hydrogène; et
- la réaction de régénération du monoxyde de carbone est donc moins importante dans le cas de l'injection de charbon.

MODIFICATION THERMIQUE DES RÉACTIONS DU HAUT FOURNEAU

Le taux de production du haut fourneau est lié directement au taux de production de chaleur. Le fonctionnement d'un haut fourneau atteint l'efficacité maximale à la limite supérieure de la TRAC pour les conditions de la charge utilisée (Fig. 12) (24). Le moyen le plus efficace d'augmenter la TRAC est d'élever la température du vent des tuyères.

Malheureusement, on ne peut augmenter indéfiniment la TRAC sans conséquences pour le fonctionnement du haut fourneau : accrochage ou glissement de la charge, perte de production. Pour maintenir une température élevée sans dépasser la TRAC maximale, il faut que des réactions endothermiques se produisent dans la zone de combustion. L'injection de vapeur par les tuyères, le système le plus ancien de refroidissement, a été remplacée par l'injection, plus efficace, de combustible de remplacement. La réaction endothermique de l'eau et du charbon refroidit la cavité de la zone de combustion et abaisse la température des gaz qui s'échappent de cette zone. On peut augmenter la température du vent et diminuer son humidité sans provoquer de difficultés opérationnelles.

Parmi les combustibles injectables, le gaz naturel est celui qui a l'effet de refroidissement le plus élevé. Viennent ensuite le pétrole puis le charbon, comme le montre la figure 13 (25). L'effet du charbon, du pétrole et des mélanges charbon–pétrole sur la température dans la cavité, déduit de modèles théoriques, est indiqué à la figure 14 (26). En général, les combustibles ont un effet refroidisseur d'autant plus faible que le rapport C/H est plus élevé.

TAUX D'INJECTION DU CHARBON

Le charbon a un rapport C/H plus élevé que les autres combustibles et donc un effet refroidisseur moindre, ce qui fait qu'il faut en injecter de plus grandes quantités, comme le montrent les modèles informatiques (Fig. 15) (27).

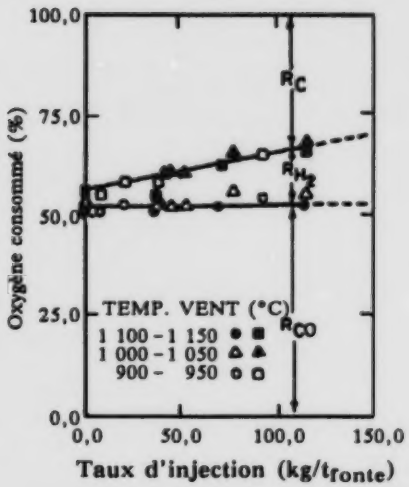


Fig. 9 – Relation entre la consommation d'oxygène et le taux d'injection de charbon

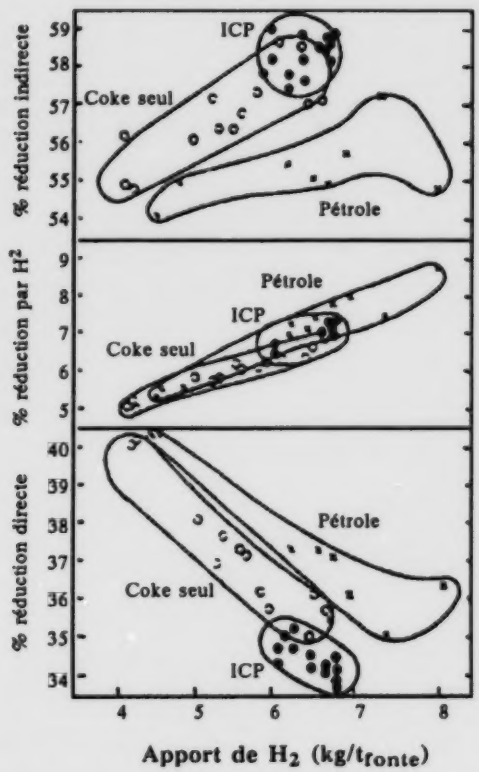


Fig. 10 – Effet de l'apport d'hydrogène sur le processus de réduction (haut fourneau n° 1, Oita, Japon)

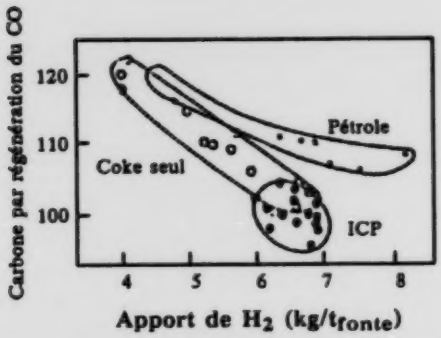


Fig. 11 – Relation entre l'apport d'hydrogène et la réaction de régénération du CO

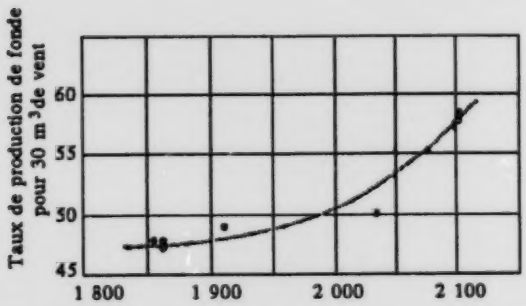


Fig. 12 – Relation entre la production de fonte et la TRAC

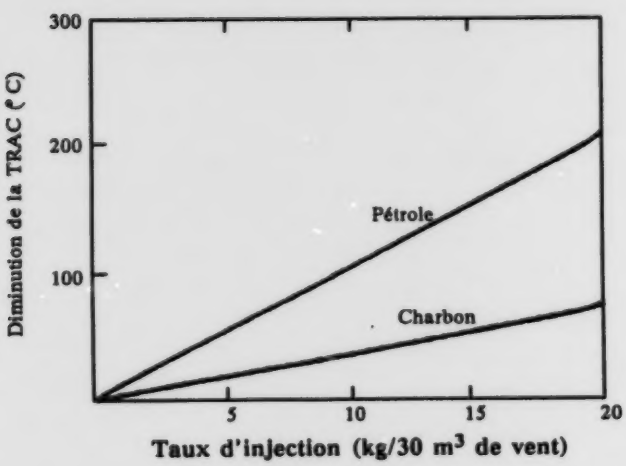


Fig. 13 – Effet de l'injection de combustible de remplacement sur la TRAC

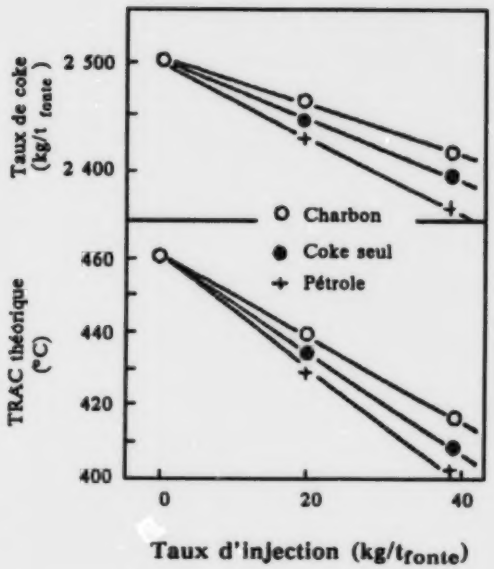


Fig. 14 – Variations de la TRAC et de la consommation de coke avec le taux d'injection

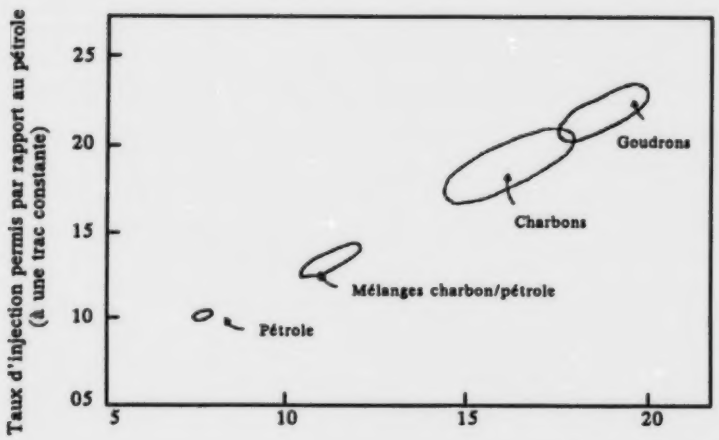


Fig. 15 – Taux d'injection de combustible de remplacement permis par rapport au pétrole à une TRAC constante

De tous les charbons, ce sont les anthracites qui ont l'effet refroidisseur le plus faible (le rapport C/H le plus élevé). Ils peuvent donc être injectés en grandes quantités pour maintenir la TRAC optimale, à condition de prévoir une augmentation de la température du vent ou une diminution de son humidité. D'une façon générale, les taux d'injection de charbon varient entre 24 et 182 kg/t_{fonte} (voir Annexe A, Tableau A-7), mais en Chine, on a utilisé jusqu'à 279 kg/t_{fonte} d'anthracite (45,2 % du combustible total) (28). Lorsque le taux d'injection dépasse 45 % du combustible total, le taux de coke augmente et le rapport de remplacement diminue. Par ailleurs il devient difficile de maintenir un fonctionnement régulier (28).

La relation entre le taux d'injection de charbon et certains facteurs opérationnels, déterminée au haut fourneau n° 1 d'Oita est indiquée à la figure 16 (23). La TRAC diminuait lorsque le taux d'injection dépassait 30 kg/t_{fonte}, le point auquel la température du vent atteignait sa limite supérieure. Une autre chute se produisait à 60 kg/t_{fonte}, lorsque le système de déshumidification atteignait sa capacité limite.

Pour déterminer le taux optimal d'injection de charbon, il faut prendre en considération la combustibilité du charbon et le rapport stoechiométrique, ainsi que la TRAC. Une augmentation du taux de charbon au-delà de la valeur optimale déterminée pour certains facteurs opérationnels peut entraîner une combustion incomplète et nuire à la perméabilité de la charge et donc à la diffusion des gaz et de la chaleur dans le haut fourneau.

L'importance d'un taux d'injection adéquat est illustrée à la figure 17 (20). Elle montre qu'il y a une amélioration marquée de la performance du haut fourneau lorsque la quantité de charbon injectée passe de 50 à 70 kg/t_{fonte}. Le taux le plus élevé abaissait la zone de cohésion et contribuait au gonflement de la zone des agglomérats, améliorant ainsi l'utilisation du monoxyde de carbone. Un tel abaissement de la zone de cohésion est essentiel pour diminuer la consommation de combustible.

RAPPORT DE REMPLACEMENT

Dans un haut fourneau, le coke a plusieurs fonctions et, dans l'état actuel des choses, seule une partie (30 à 40 %) peut être remplacée par du charbon.

Le rapport de remplacement est le rapport de la masse de coke économisée à la masse du combustible injecté pour le remplacer. Il dépend d'une interaction complexe de facteurs physiques et chimiques et il est influencé par :

- la qualité du charbon (teneur en cendres, rapport C/H);
- les conditions de combustion et le pourcentage brûlé;
- la qualité de la charge et la diffusion des gaz; et
- la TRAC.

L'influence de la teneur en cendres sur le rapport de remplacement a été prouvée de façon théorique et expérimentale, et est discutée plus loin. Fletcher et Garbee ont relié le rapport de remplacement à la teneur en cendres du charbon et du coke par la formule suivante (29) :

rapport de remplacement = 1,48 – 0,666 (% de cendres de charbon/% de cendres de coke)

Cette relation vient de données obtenues lors d'essais grandeur réelle avec des charbons très volatils (34,7-38,3 %) contenant 4,6-9,8 % de cendres.

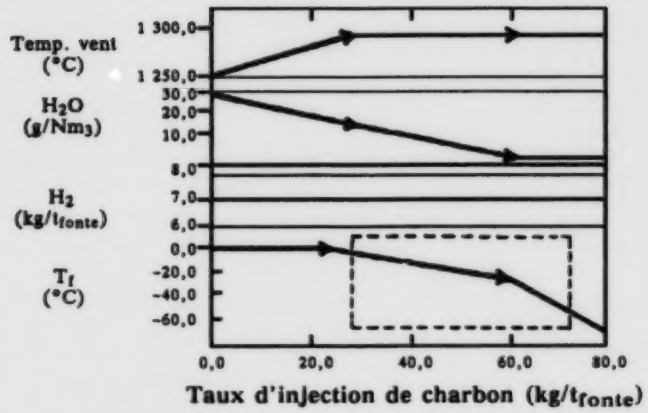


Fig. 16 – Relation entre le taux d'ICP et la TRAC (haut fourneau n° 1, Oita, Japon)

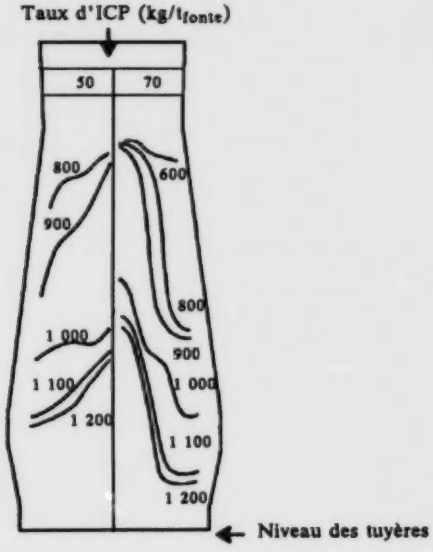


Fig. 17 – Influence du taux d'ICP sur le profil des températures (haut fourneau n° 3, Kobe, Japon)

Il y a une autre formule empirique qui relie le rapport de remplacement du coke à la teneur en cendres du charbon (30) :

rapport de remplacement = 1,037 – 0,01576 x cendres du charbon

Celle-ci est fondée sur les données moyennes suivantes : carbone du charbon, 84,90 %; cendres du charbon, 12,63 %; soufre du charbon, 0,65 %; température du vent, 1 045°C; enrichissement en oxygène, 0,69 %; basicité du laitier, 1,0; CO/CO_2, 1,47.

La figure 18 (31) relie le rapport C/H du charbon au rapport de remplacement selon des calculs théoriques montrant que l'anthracite peut remplacer plus de coke que les charbons à plus haute teneur en matières volatiles. La figure 19 (27) est un diagramme schématique d'un modèle informatique montrant le remplacement prévu du coke pour les différents charbons et pour d'autres combustibles, en fonction de leur teneur en carbone et en hydrogène.

Cependant, le remplacement total possible du coke, par tonne de fonte, est lié au total de combustible utilisé ainsi qu'au rapport de remplacement du coke par unité de masse du combustible injecté. La figure 20 (27) donne le remplacement total du coke permis, par rapport au pétrole, (selon des prévisions informatiques) en fonction de la teneur en carbone et en hydrogène du combustible injecté. Les charbons et les goudrons, comme on peut le voir, sont ceux qui offrent le rapport de remplacement le plus élevé à une TRAC donnée.

Les figures 19 et 20 montrent que même si le charbon remplace moins de coke par unité de masse de matière injectée que le pétrole, on peut en injecter de plus grandes quantités, ce qui conduit à un remplacement total supérieur.

Les résultats d'expériences grandeur réelle (Fig. 21) (15) indiquent que le rapport de remplacement du coke est directement proportionnel à la TRAC. D'autres chercheurs l'ont confirmé en montrant que le rapport de remplacement diminuait si l'état thermique du creuset du haut fourneau était inadéquat (32).

INFLUENCE DE L'INJECTION DE CHARBON SUR LA QUALITÉ DU COKE REQUIS

Dans un haut fourneau, le coke a plusieurs fonctions :

- fournir la plus grande partie de la chaleur et de l'énergie;
- servir de réducteur et de source de gaz réducteur; et
- servir de support perméable à la charge.

Le coke est le seul élément de la charge qui descende jusqu'à la partie inférieure du haut fourneau sous sa forme solide et qui devienne plus perméable. C'est pour cette raison que la qualité du coke (son aptitude à résister à l'écrasement) est considérée comme un facteur critique de l'exploitation d'un haut fourneau. En effet, sa dégradation réduit sa perméabilité, ce qui modifie non seulement la diffusion du gaz ascendant, mais aussi le transfert de la chaleur, le profil des températures et aussi le profil de la zone de ramollissement et de fusion. La réaction de régénération du CO élimine environ 20 à 30 % du coke, mais en ne lui faisant perdre que 3 % de son volume (33). Le coke perd environ 20 % de son volume par dégradation et affaiblissement, ce qui montre que la réaction précédente affaiblit aussi le coke, indirectement.

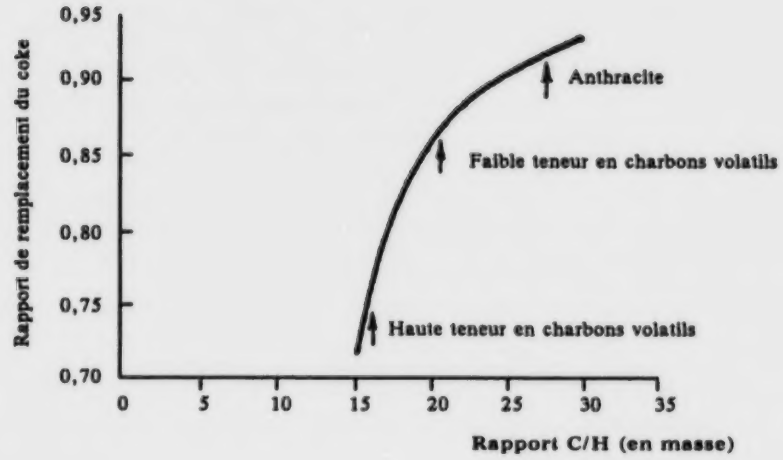


Fig. 18 – Rapport de remplacement en fonction du C/H du charbon

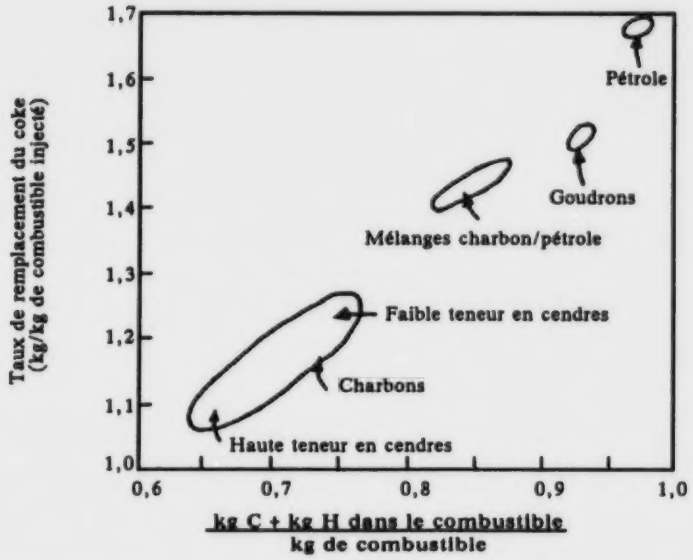


Fig. 19 – Taux de remplacement du coke par unité de masse de combustible injecté

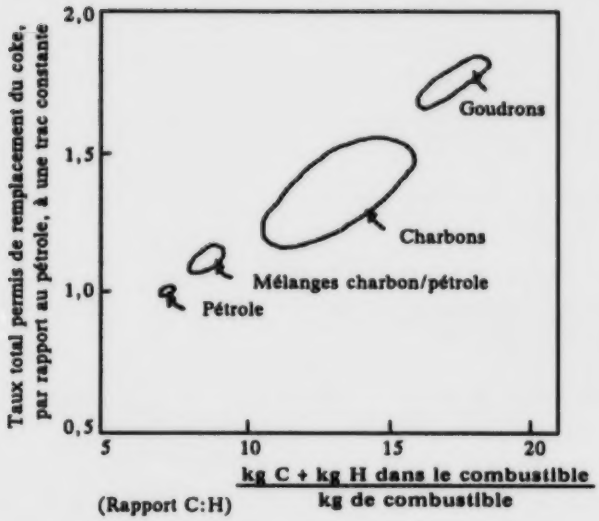


Fig. 20 – Taux total de remplacement du coke permis par rapport au pétrole, à une TRAC constante

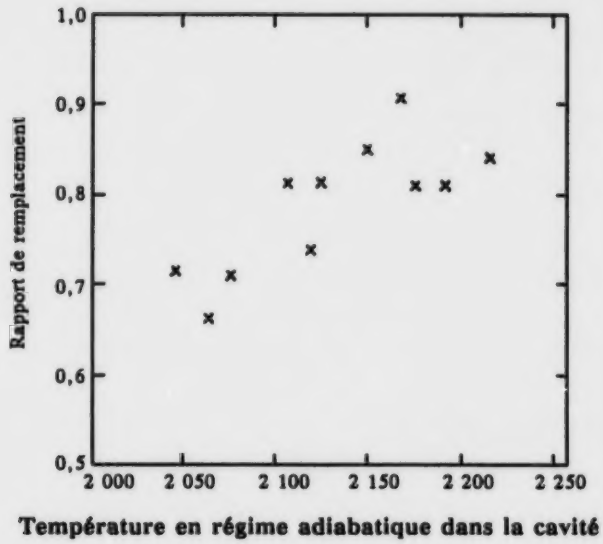


Fig. 21 – Variation du rapport de remplacement avec la TRAC

Lorsqu'on injecte du charbon dans le haut fourneau (voir Fig. 10 et Fig. 11), la réaction de régénération de CO est réduite en faveur de la réduction indirecte. Cela pourrait signifier qu'on améliore la perméabilité de la charge (ou qu'on peut se contenter d'un coke moins résistant) lorsque l'on injecte du charbon, car la résistance du coke ne se trouve pas autant affaiblie par cette réaction. Toutefois, cette théorie n'a pas été vérifiée expérimentalement et d'autres études seraient nécessaires.

SYSTÈMES MÉCANIQUES

CONSIDÉRATIONS GÉNÉRALES

L'injection de charbon est plus complexe et nécessite un contrôle plus strict que l'injection de pétrole ou de gaz naturel pour maintenir un fonctionnement efficace et stable du haut fourneau (1). Lorsqu'on utilise l'ICP, voici ce qu'il faut prendre en considération :

- la granulométrie du charbon;
- la prévention des explosions de poussière;
- le fonctionnement continu aux pressions requises;
- l'injection de la même quantité de charbon dans chaque tuyère, indépendamment des variations de pression du vent;
- la facilité de régler le taux d'injection;
- la commande automatique du taux d'injection dans les conditions de fonctionnement anormal;
- l'affichage et l'enregistrement correct de la masse de charbon injecté;
- la possibilité d'accepter diverses qualités de charbons;
- le fonctionnement automatique; et
- les dimensions des installations.

L'aspect le plus important de l'ICP est la prévention des accidents dus à des explosions ou à des incendies, qui pourraient être dangereux pour le personnel et le matériel. Ces risques sont fonction de la granulométrie du charbon, de sa teneur en humidité, du type de charbon et de la source d'inflammation. C'est pour cela que l'on recommande les précautions suivantes pour prévenir les explosions :

- utilisation de réservoirs protégés de l'air, fonctionnant sous vide;
- régulation de la concentration d'oxygène dans chaque unité;
- élimination de toutes les sources d'inflammation, comme les morceaux de métal ou les sources d'électricité statique.

Un des problèmes que l'on rencontre fréquemment dans l'industrie est le blocage des conduites, qui peut être provoqué par des matériaux plus grossiers ou par une augmentation de la teneur en eau. En pratique, une humidité supérieure à 3 % entraîne la formation de petites boules qui nuisent à l'écoulement du charbon au niveau de la sortie du réservoir (8). La meilleure façon d'éviter l'obstruction est de maintenir une teneur en eau de l'ordre de 1 %.

Dans l'industrie on a utilisé des dispositifs mécaniques (Koppers) aussi bien que des dispositifs pneumatiques (Babcock & Wilcox, Petrocarb, Chine, etc.)

SYSTÈME PETROCARB

Le système Petrocarb (8, 11, 12, 20, 24, 34, 35, 36–39) (Fig. 22) (34) est constitué de deux sous-systèmes : une usine de préparation et le système d'injection (Fig. 23) (8, 38).

Le charbon brut est acheminé à l'usine de préparation où il est broyé au degré de finesse désiré, puis séché. Pour cela, on utilise des concasseurs à chocs (8, 36, 38) et des broyeurs à cylindres (1, 20, 34), ces derniers s'étant révélés préférables aux autres, car ils possèdent des cribles qui contrôlent la taille des particules. Le charbon peut être simultanément broyé et séché par des gaz à basse température. On utilise habituellement les gaz sortant des récupérateurs Cowper (qui sont à environ 130°C), mais on peut aussi utiliser d'autres gaz auxiliaires (1, 20). Par souci de sécurité, on contrôle la température des gaz à l'entrée et à la sortie du broyeur.

Les injecteurs de réservoir de stockage et d'injection primaire constituent le coeur du sous-système de distribution et d'injection (voir Fig. 22 et Fig. 23). Lorsque le niveau de charbon dans le réservoir de stockage tombe au-dessous d'une quantité déterminée, indiquée par des capteurs piézoélectriques, celui-ci est automatiquement rempli. Ce réservoir est alternativement sous pression et sous dépression. Lorsque le charbon alimente l'injecteur, il est sous dépression, alors que lorsque le charbon est transféré au réservoir d'injection, il est sous pression. L'injecteur primaire est toujours sous pression. Le charbon est continuellement transporté pneumatiquement de l'injecteur primaire au haut fourneau par l'intermédiaire des tuyères. Au début tout le système était dédoublé; il y en avait un pour les tuyères paires et un autre pour les tuyères impaires. On a maintenant simplifié les choses et on utilise un système unique (voir Fig. 22).

Le taux d'injection du charbon, mesuré par des capteurs piézoélectriques, dépend de la différence de pression entre le vent chaud et l'injecteur. Si le taux d'injection s'éloigne des niveaux prévus, on modifie la pression dans l'injecteur primaire pour corriger la situation. Lorsque la pression du vent augmente, la pression dans l'injecteur augmente automatiquement dans les mêmes proportions. C'est l'inverse qui se produit lorsque la pression du vent diminue. La Kobe Steel Corporation a remplacé le dispositif de mesure de la différence de pression par un dispositif de mesure pondérale du charbon injecté (Fig. 24) (1).

L'injecteur primaire est constamment balayé par un gaz inerte (azote). Ce gaz a non seulement pour effet de maintenir la pression, mais aussi de fluidiser le charbon et de ramener la concentration d'oxygène au-dessous de la limite explosive. Dans le système Petrocarb, un système de sécurité (8, 36) ferme les vannes à la sortie de l'injecteur dans les conditions suivantes :

- arrêt des compresseurs d'air;
- panne des instruments de surveillance de l'apport d'air; ou
- pression trop élevée ou trop faible dans le porte-vent.

MODIFICATIONS DU SYSTÈME PETROCARB

Certaines modifications du système Petrocarb ont été faites à Stanton (Royaume-Uni), où l'on utilise un concasseur et un séchoir combinés (36).

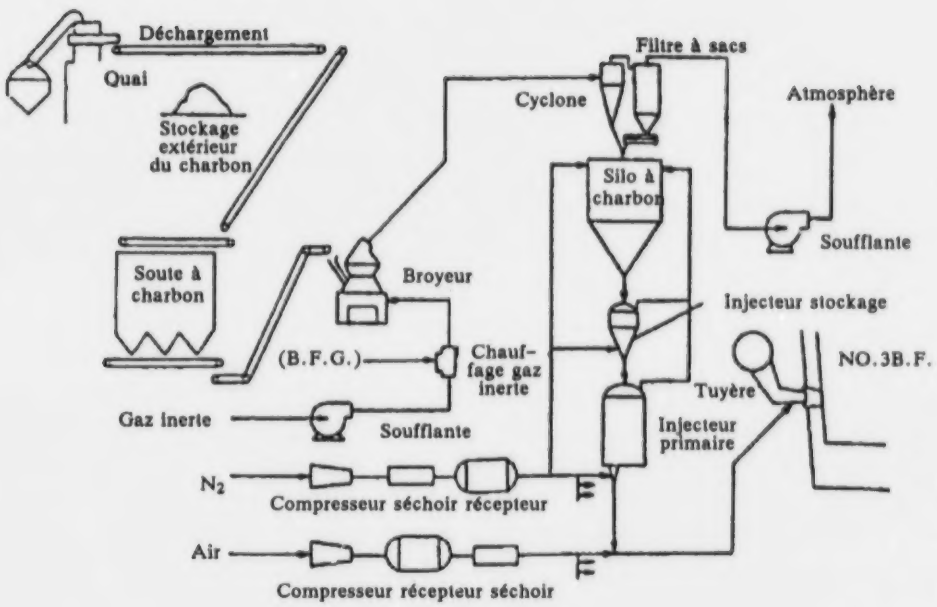


Fig. 22 – Diagramme du système Petrocarb d'injection de charbon (haut fourneau n° 3, Kobe, Japon)

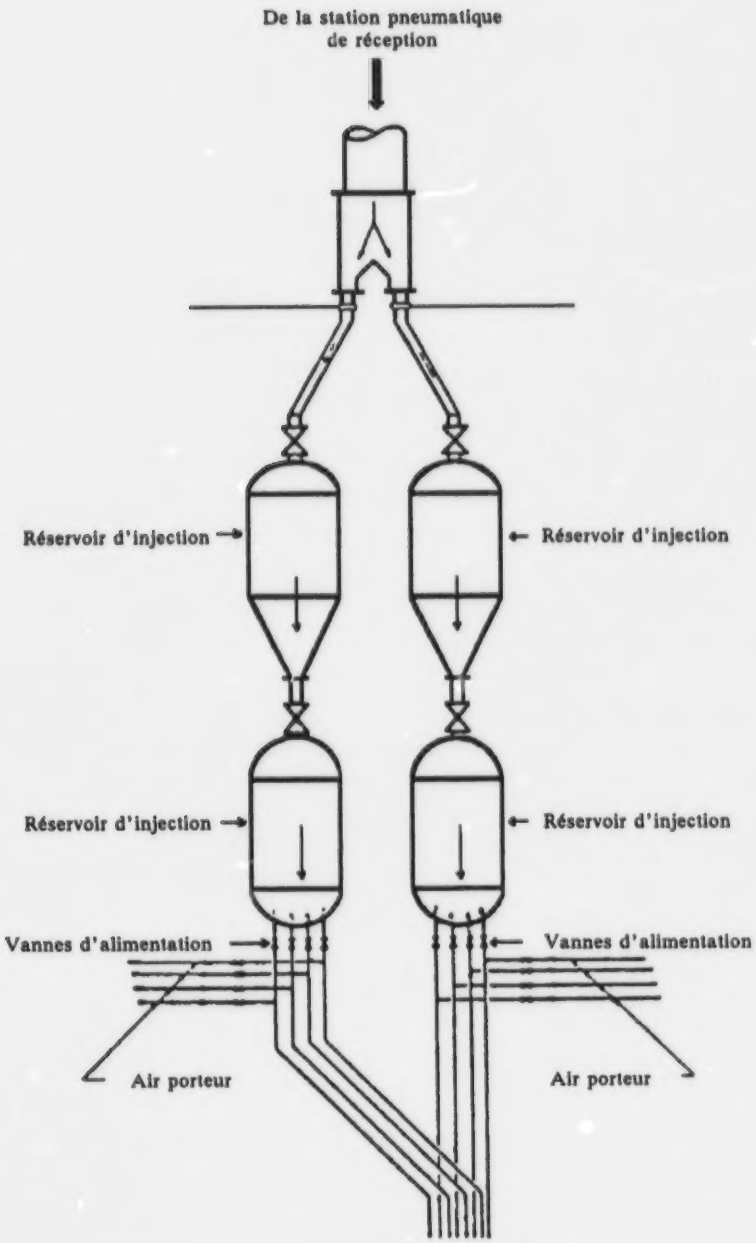


Fig. 23 – Sous-système Petrocarb de distribution et d'injection

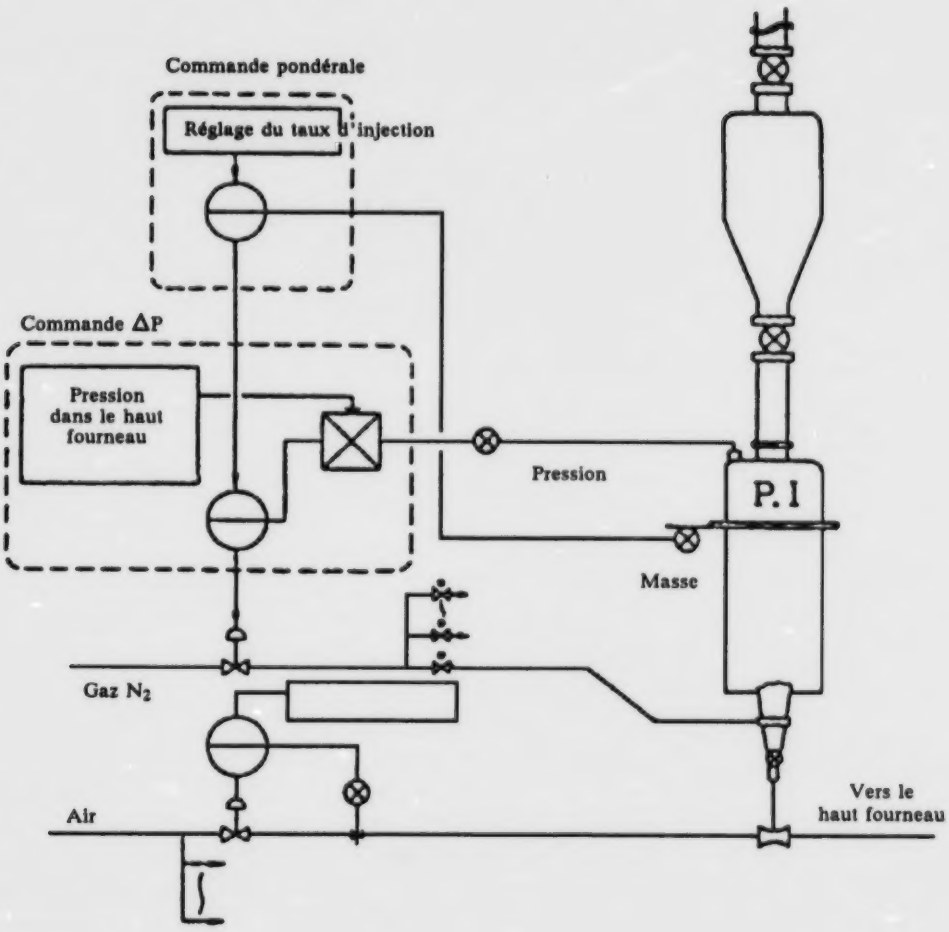


Fig. 24 - Système modifié (Kobe-Petrocarb) de commande d'injection

SYSTÈME KAWASAKI

Le système d'injection polyvalent mis au point par la Kawasaki Steel Corporation et Denka Engineering (40, 41) permet d'injecter des poudres diverses (charbon, fines de minerai et carbonate de calcium) dans les tuyères. Le but de l'injection de ces produits est de contrôler la teneur en silicium et en soufre du métal fondu. Le système de distribution et d'injection est montré à la figure 25 (40) et on donne à la figure 26 un diagramme de tout le système (40). Le taux d'injection est contrôlé pneumatiquement en modifiant le débit du gaz porteur, ce qui élimine les dispositifs mécaniques. La figure 27 (40) montre un diagramme de la commande d'injection des poudres. La précision obtenue est de ± 1 % du taux maximal d'alimentation.

SYSTÈME ARMCO-BABCOCK & WILCOX

Au début des années 60, ARMCO et Babcock & Wilcox ont mis au point et appliqué industriellement le système d'injection de charbon décrit par Bell et coll. (14). Il était constitué de deux systèmes parallèles, fonctionnant indépendamment l'un de l'autre, alimentant chacun 8 des 16 tuyères du haut fourneau de Bellefonte. Tous les éléments, sauf les soutes de charbon brut et l'épurateur humide, fonctionnaient sous une pression d'au moins 1 atm. au-dessus de la pression de la ceinture de vent. L'expérience acquise avec cette première version a conduit à des modifications radicales de la conception. Le système modifié (42-46) est uniquement pneumatique et est divisé en deux sous-systèmes : haute pression et basse pression. Le sous-système basse pression (Fig. 28) (45) englobe le chauffage, le séchage et la pulvérisation du charbon, ainsi que le stockage du charbon pulvérisé dans un réservoir purgé d'air (45). Pour éviter l'arrêt du système pendant l'inspection et l'entretien on a doublé les conduites de charbon pulvérisé.

Le sous-système haute pression, schématisé à la figure 29 (45), possède trois réservoirs d'alimentation remplis de charbon pulvérisé sec. Ces réservoirs sont utilisés de façon séquentielle. Ainsi, pendant qu'un réservoir injecte du charbon au haut fourneau, un autre est en cours de remplissage et le troisième en cours de pressurisation. Le charbon est acheminé aux tuyères par de l'air comprimé. Le taux d'injection est commandé par la variation de la pression du réservoir d'alimentation utilisé. Les réservoirs d'alimentation et le réservoir de stockage sont pressurisés avec un gaz inerte. Les principales différences entre le système d'injection du haut fourneau Bellefonte et la version modifiée du haut fourneau Amanda font l'objet du tableau A-1 (44).

Les figures 30 et 31 (43) montrent le système ARMCO - Babcock & Wilcox installé aux aciéries Hoogovens, aux Pays-Bas. Un des éléments essentiels de ce système est le distributeur, qui garantit une injection uniforme à toutes les tuyères. Selon la documentation, le système ARMCO - Babcock & Wilcox assure une précision suffisante de la distribution de charbon (Fig. 32) (43).

SYSTÈME KOPPERS

Le système Koppers (13, 24, 35, 39), d'abord utilisé à la Weirton Steel Division (É.-U.) (39), utilise le système d'alimentation mis au point par le Locomotive Development Committee de la Bituminous Coal Research Inc. La figure 33 (39) donne les principaux éléments de ce système.

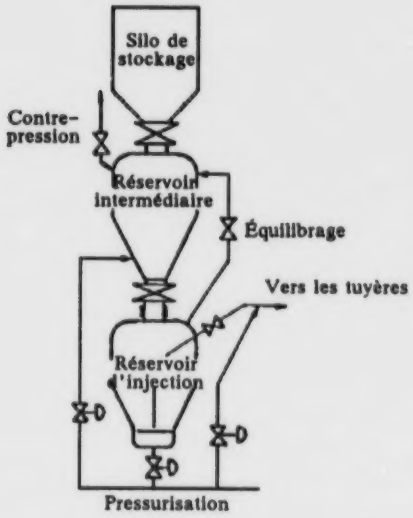


Fig. 25 – Sous-système de distribution et d'injection du système polyvalent Kawasaki

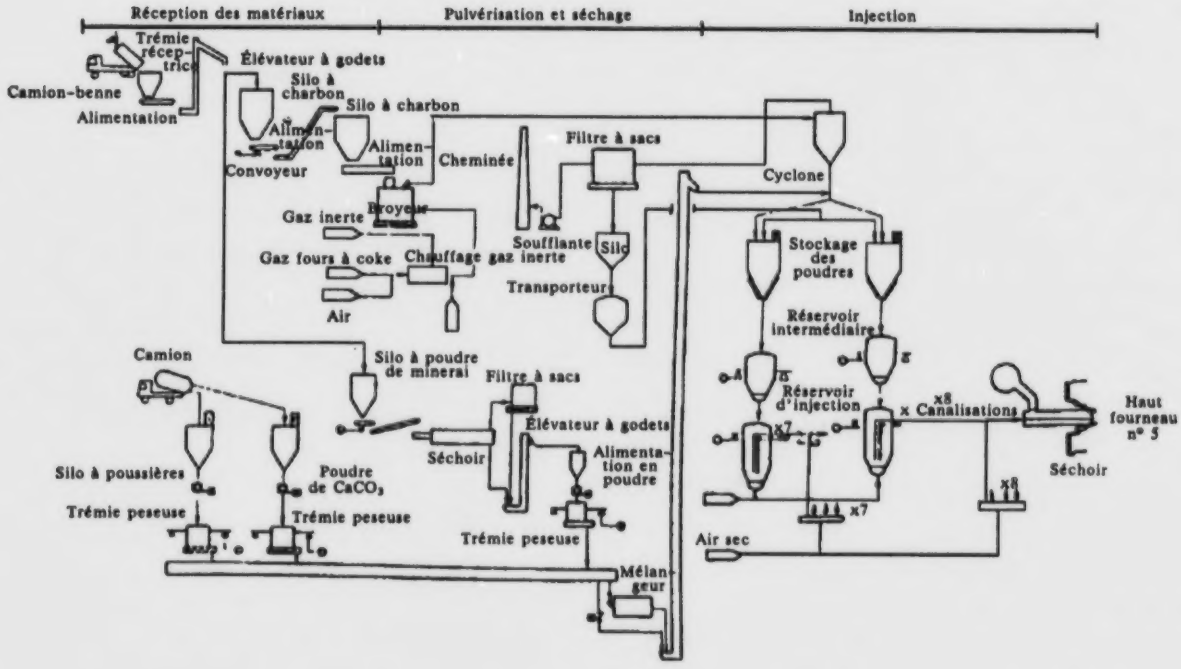


Fig. 26 – Diagramme du système polyvalent Kawasaki (haut fourneau n° 5, Chiba, Japon)

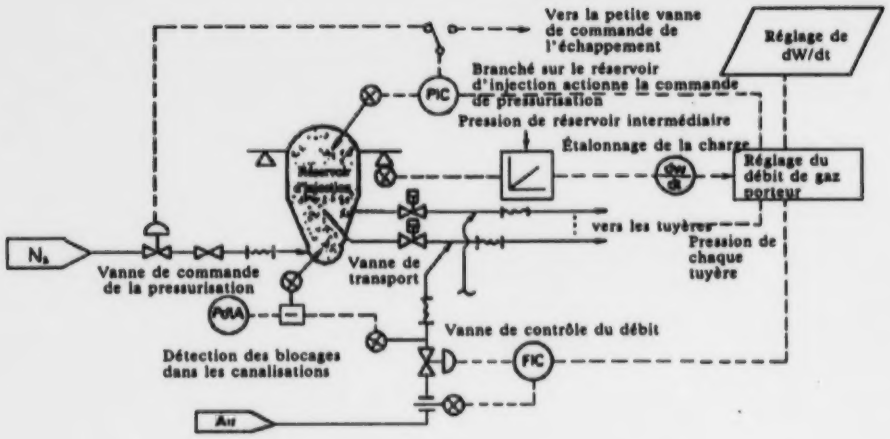


Fig. 27 – Diagramme de commande de l'injection des poudres (Kawasaki Steel Corporation)

Système basse pression : pulvérisation et collecte du charbon

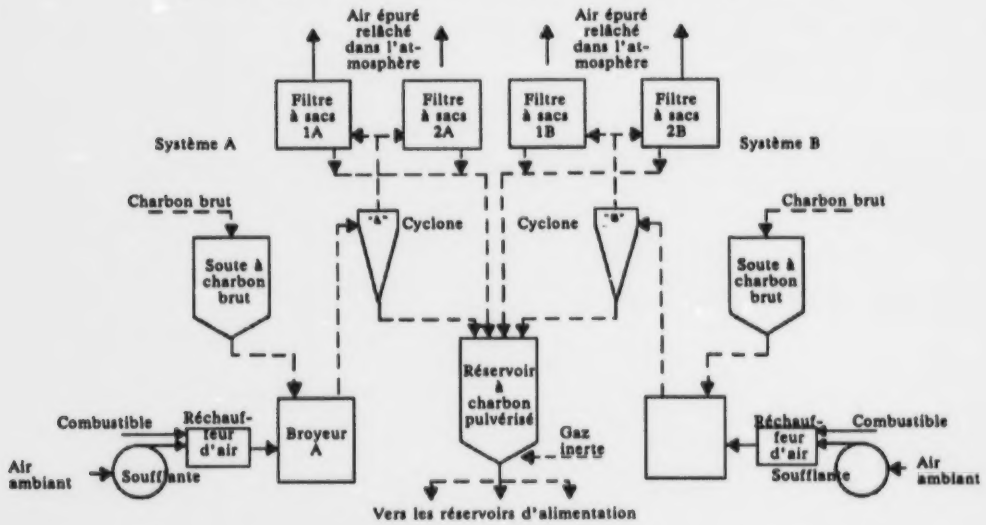


Fig. 28 – Diagramme du système ARMCO–Babcock & Wilcox (Amanda)

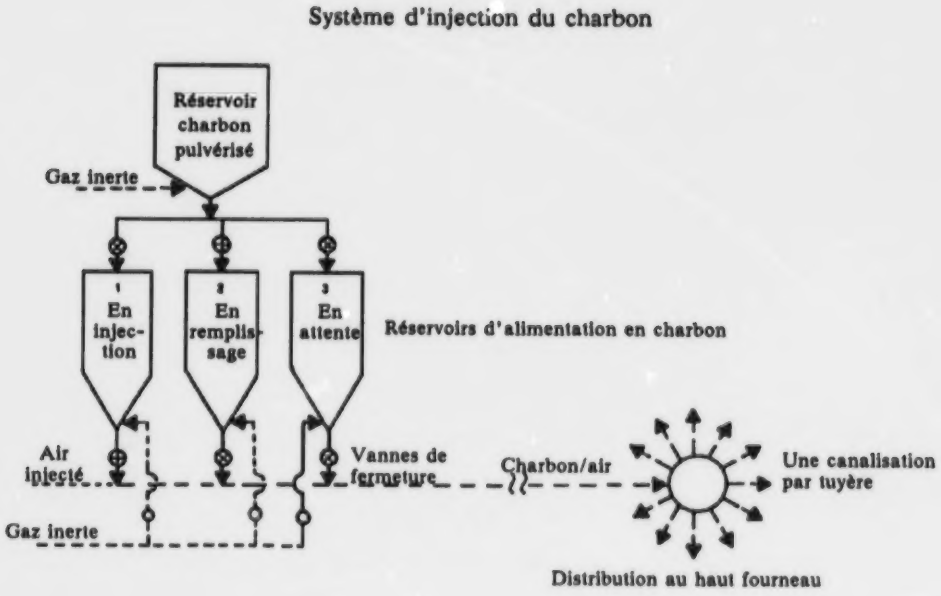


Fig. 29 – Sous-système de distribution et d'injection du système ARMCO-Babcock & Wilcox (Amanda)

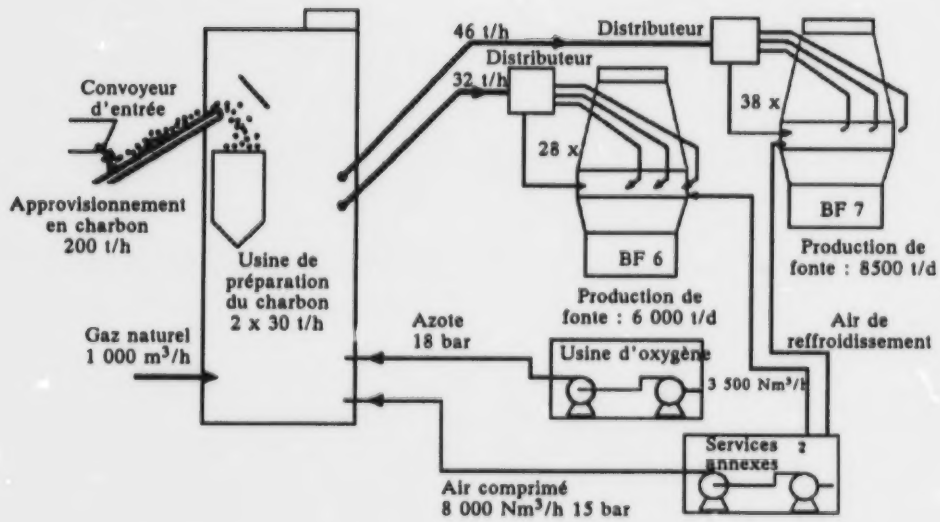


Fig. 30 – Préparation, distribution et injection du charbon (Aciéries Hoogovens Ijmuiden)

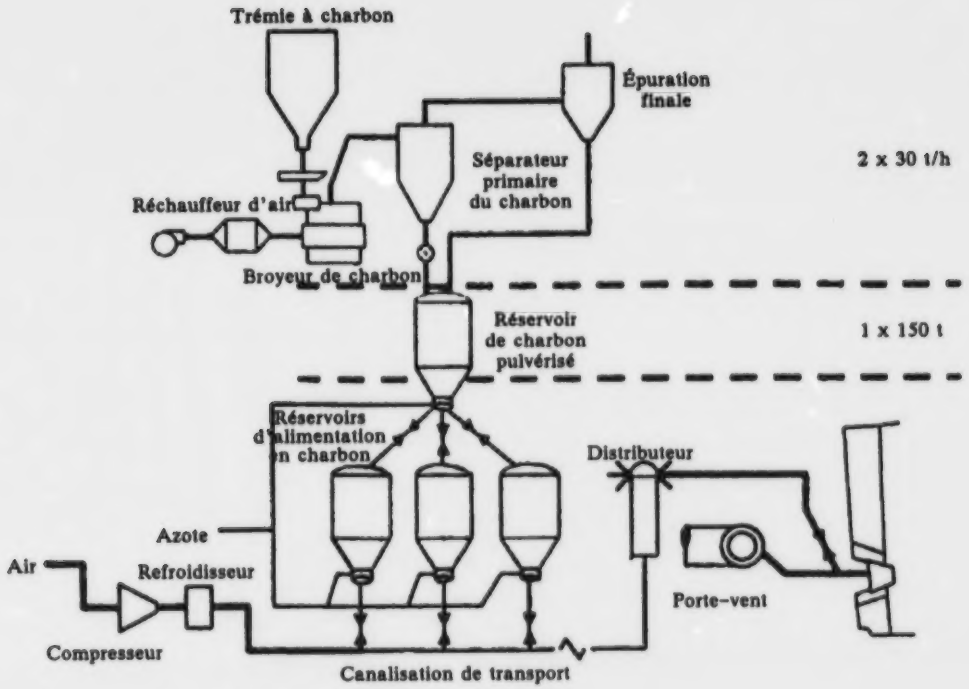


Fig. 31 – Sous-système de distribution et d'injection (Aciéries Hoogovens Ijmuiden)

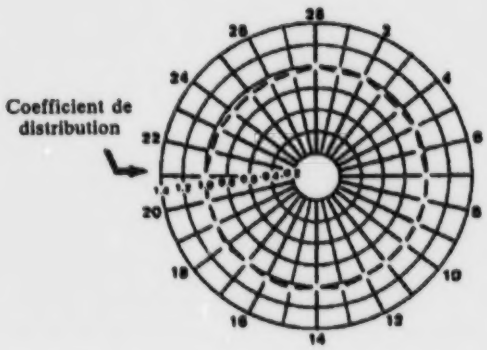


Fig. 32 – Distribution ciculaire du charbon (Aciéries Hoogovens Ijmuiden)

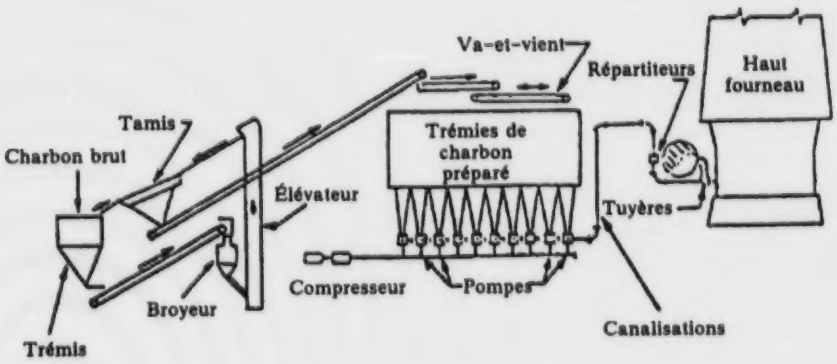


Fig. 33 – Système Koppers

Il permet d'installer le réservoir de stockage du charbon et l'équipement d'alimentation au niveau du sol. Le coeur du système est le dispositif d'alimentation (avec pompe à charbon) que l'on voit à la figure 34 (35). Sous le réservoir se trouve une série de dispositifs d'alimentation. Le charbon est introduit dans le réservoir par gravité. Ensuite, le rotor de la pompe amène le charbon devant le trou de sortie où de l'air à haute pression l'entraîne vers les canalisations. À l'arrivée au haut fourneau, le charbon d'une pompe est partagé en deux flots qui sont envoyés à des tuyères non adjacentes. Le débit du charbon est réglé par la vitesse de rotation de la pompe.

INJECTION KLOCKNER

Avec le système d'injection Klockner (47, 48) on peut utiliser du charbon pulvérisé ou granulaire (3 mm max.). Ce système peut être appliqué de différentes façons (Fig. 35) (48). À la Svenska Stal AB, Lulea, Suède, on utilise l'alimentation uniforme des tuyères. Lorsque le système est commandé par la différence de pression, le taux d'injection de charbon est fonction de la pression du vent à la tuyère. Si la pression augmente à une tuyère donnée, une petite quantité d'air est injectée dans cette tuyère. Cela réduit automatiquement la quantité de charbon qui y est injectée et augmente un peu celle que reçoivent les autres tuyères. Dans l'autre système uniforme, la quantité de charbon injectée reste constante dans une situation similaire.

SYSTÈME ARBED-WURTH

Le système ARBED-Wurth (49-52) a été utilisé aux hauts fourneaux ARBED-Belval, à Esh-sur-Alzette, Luxembourg, et à ceux d'USINOR, à Dunkerque, France. Les principales caractéristiques de l'installation sont (Fig. 36) (51) :

1. Le taux d'injection du charbon est optimisé :
   - l'apport total de charbon est une fonction de la quantité totale de vent, la distribution aux tuyères étant uniforme (quantité donnée exprimée en g/m³ d'oxygène dans le vent); et
   - il est possible de faire varier la quantité de charbon injectée dans chaque tuyère.
2. Le charbon pulvérisé est transporté par gravité jusqu'à ce qu'il atteigne le silo de distribution.
3. Le charbon est transporté par de l'air comprimé, séché et refroidi, provenant du circuit de vent froid.
4. Le silo d'alimentation est muni de capteurs piézoélectriques pour garantir un contrôle précis de la quantité de charbon injectée.
5. Les normes de sécurité sont élevées :
   - l'installation est prévue pour fonctionner sous une atmosphère anti-explosion (moins de 12 % d'oxygène);
   - on injecte du gaz inerte (CO_2) dans les zones critiques en réponse aux signaux de capteurs situés au niveau du réchauffage du charbon pulvérisé; et
   - il y a des membranes anti-explosion et des soupapes de sûreté.
6. Le fonctionnement est entièrement automatique.

SYSTÈME MACAWBER-BRITISH STEEL CORPORATION

Le système utilisé par la BSC (53, 54) utilise du charbon granulaire et est conçu pour fonctionner par gravité, même s'il faut parfois amorcer l'écoulement. L'expérience a montré que les silos et les trémies devaient être remplies en utilisant des systèmes d'aération qui évitent les problèmes d'écoulement.

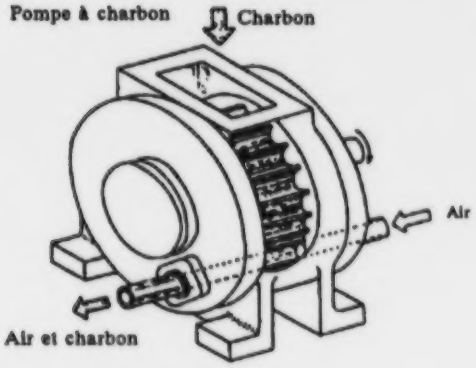


Fig. 34 – Pompe d'alimentation en charbon

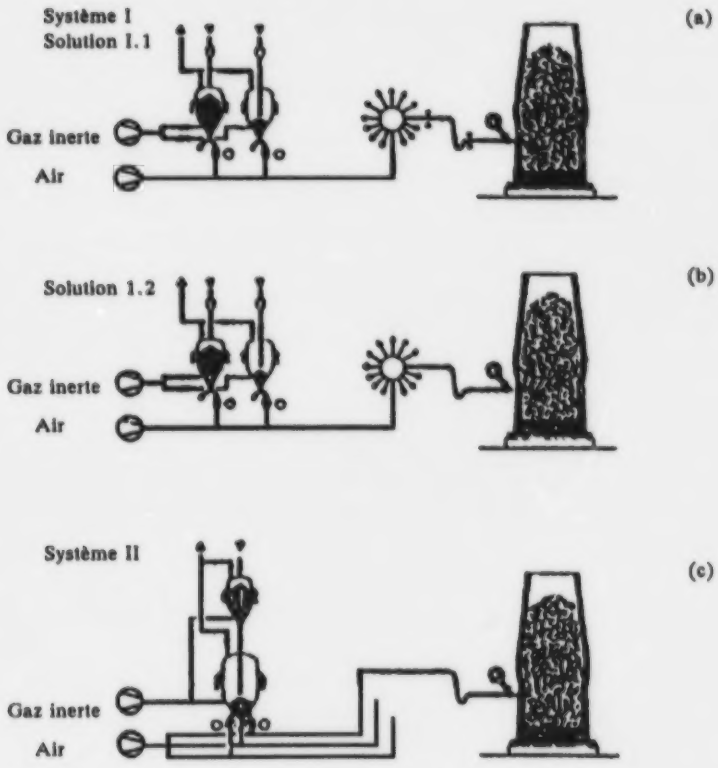


Fig. 35 – Trois versions du système Klockner :
a) alimentation uniforme des tuyères indépendamment de Δp
b) alimentation uniforme des tuyères en fonction de Δp
c) alimentation individuelle des tuyères

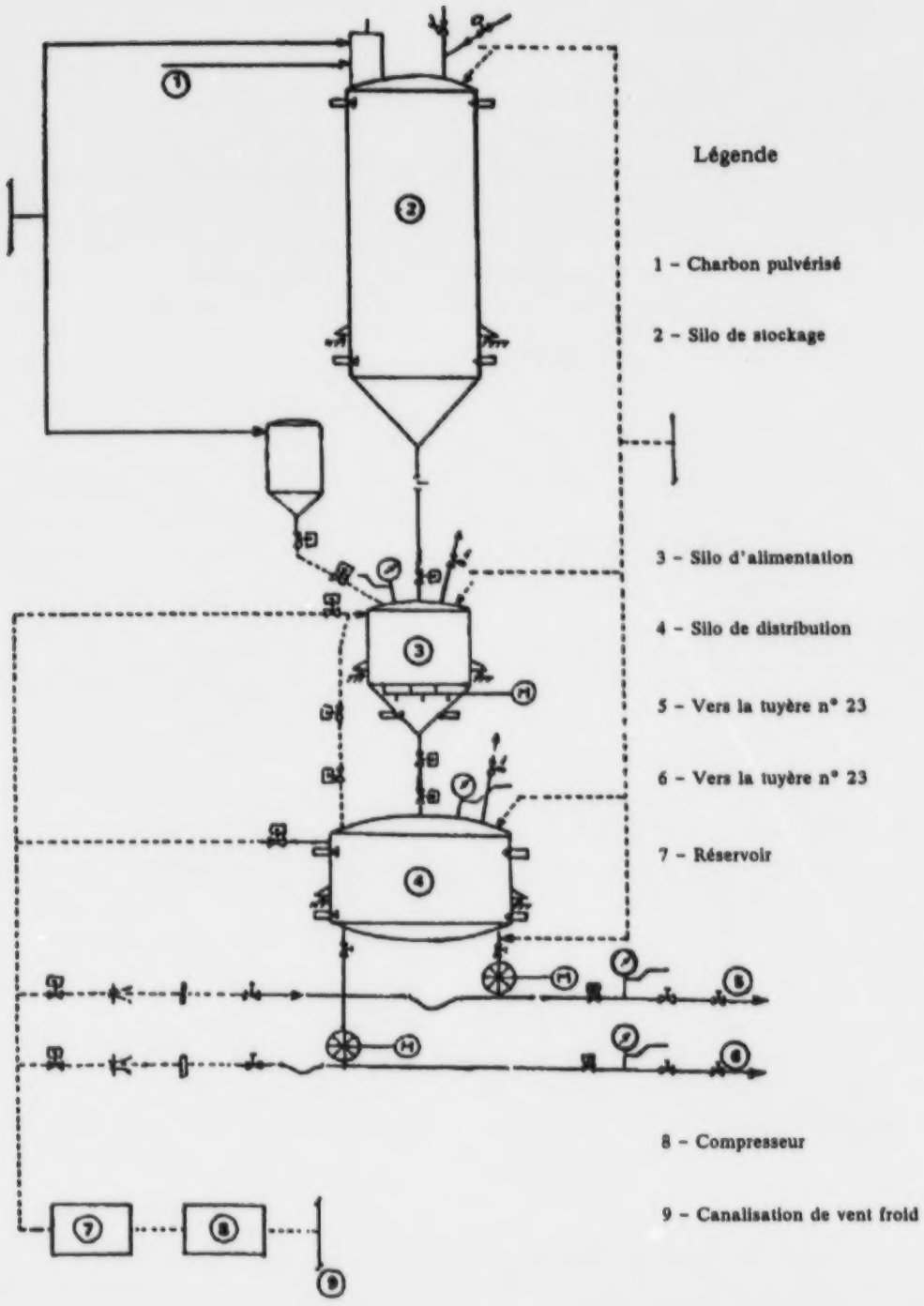


Fig. 36 - Système ARBED-Wurth

Le système comporte 12 injecteurs par haut fourneau. Le charbon est transporté pneumatiquement du réservoir d'injection aux tuyères. Chaque injecteur alimente deux tuyères. La figure 37 donne le schéma d'un système d'injection (53).

SYSTÈME CHINOIS

Le système chinois comporte trois sous-systèmes (Fig. 38) (15). La figure 39 (15) montre le sous-système d'injection. Le charbon, après passage dans un broyeur à boulets, est acheminé par convoyeur pneumatique à deux séries parallèles d'équipement d'injection. Le réservoir supérieur sert de trémie et le réservoir inférieur de dispositif de régulation de l'injection. Le réservoir inférieur est pesé par des capteurs piézoélectriques et la perte de masse détermine le taux d'injection. Le charbon est transporté pneumatiquement.

SYSTÈMES SOVIÉTIQUES

Dans la sidérurgie soviétique (35, 56-58), on a utilisé trois systèmes différents d'injection à Zaporozstal, Karaganda et Doneck. Aux aciéries Doneck (Fig. 40) (56), deux réservoirs consécutifs (intermédiaire, n° 8, et d'alimentation, n° 9) constituent les éléments essentiels du système. Dans le réservoir d'alimentation, on maintient une pression constante de 0,5 à 1 atm. au-dessus de la pression requise pour injecter le charbon dans le haut fourneau. Six dispositifs d'alimentation à disque, n° 10, sont fixés à la partie inférieure du réservoir. Ils assurent chacun l'injection d'une quantité contrôlée de charbon à l'une des six tuyères (sur 12) du haut fourneau. La quantité de charbon est déterminée par la vitesse de rotation du disque (de 5 à 15 tr/min) (56).

Le gros inconvénient du système Karaganda (Fig. 41) est le manque de précision de l'alimentation en charbon.

Un autre système, utilisé aux aciéries Zaporozstal, est présenté à la figure 42 (57). L'alimentation en charbon ayant été mauvaise, cette installation a été modifiée.

CONCLUSION

Deux types de systèmes, pneumatiques et mécaniques, sont utilisés pour transporter le charbon aux tuyères. Dans un haut fourneau on peut avoir deux modes de fonctionnement : a) des conditions normales où chaque tuyère reçoit la même quantité de vent; et b) des conditions erratiques si la pression augmente dans la cavité à une tuyère particulière, exigeant la diminution du vent à cette tuyère.

Du point de vue de l'alimentation en charbon :

- le cas a exige l'apport de la même quantité de charbon à toutes les tuyères du haut fourneau, et
- le cas b exige un apport inférieur de charbon à cette tuyère, faute de quoi le manque d'oxygène entraînera une combustion incomplète, aggravant la situation.

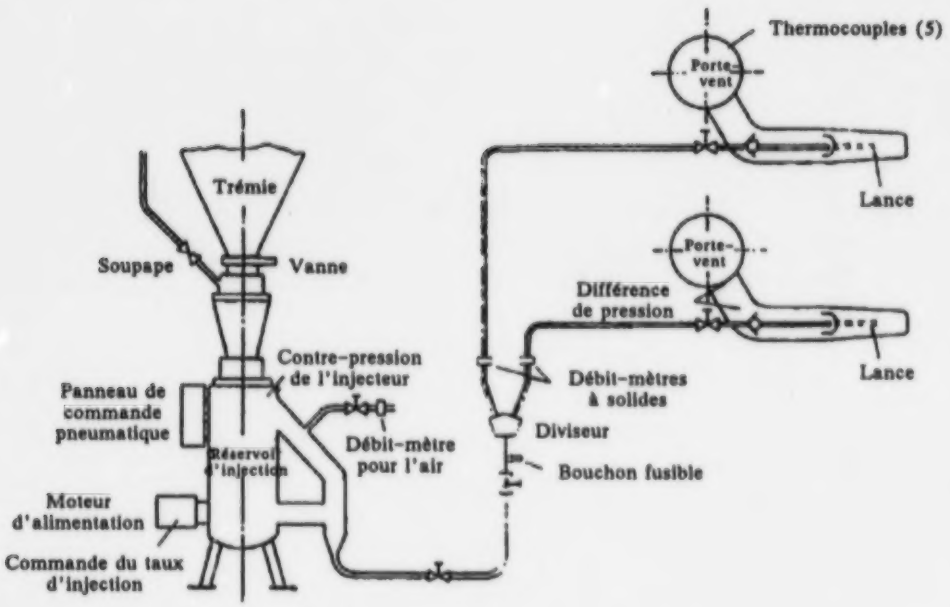


Fig. 37 – Système d'injection de la British Steel Corporation

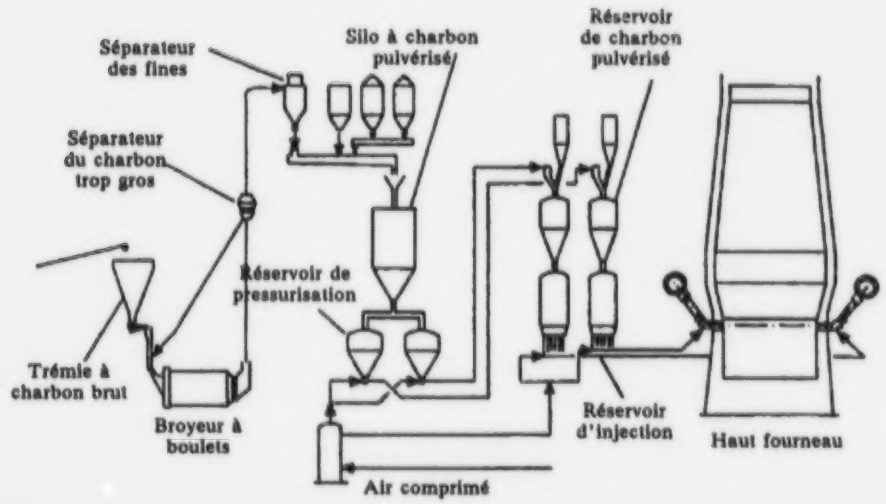


Fig. 38 – Système chinois de préparation, de distribution et d'injection du charbon

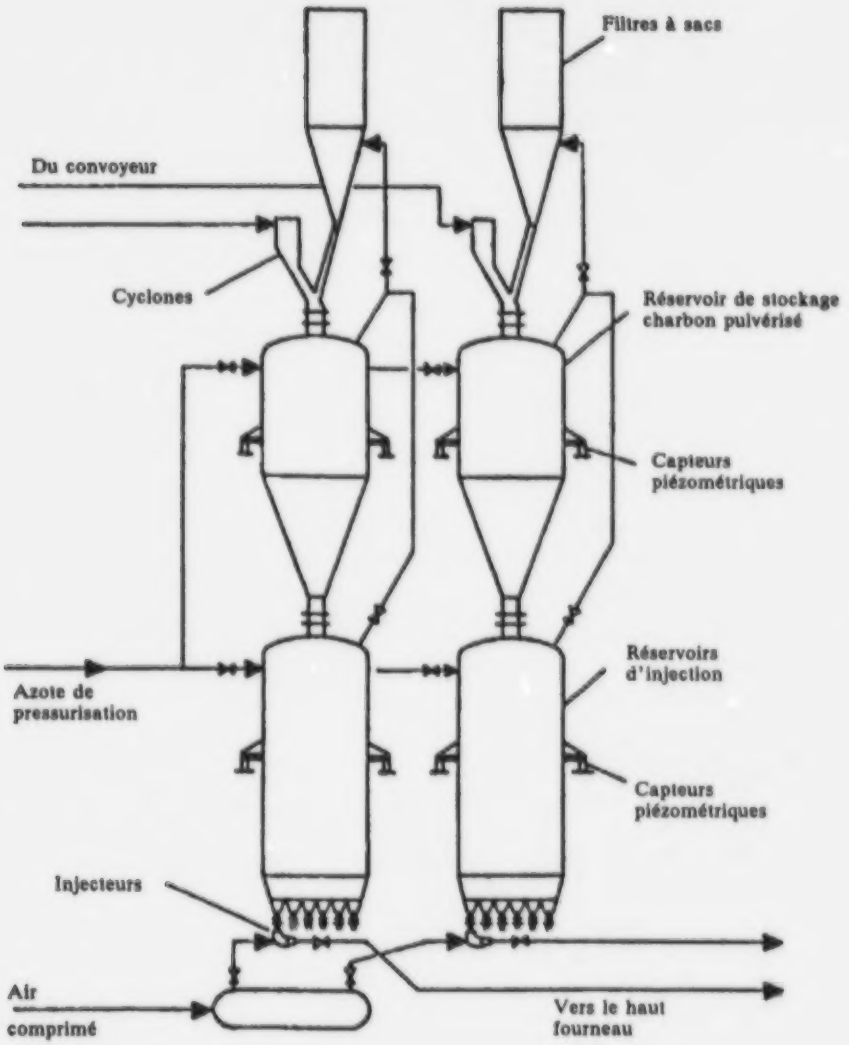
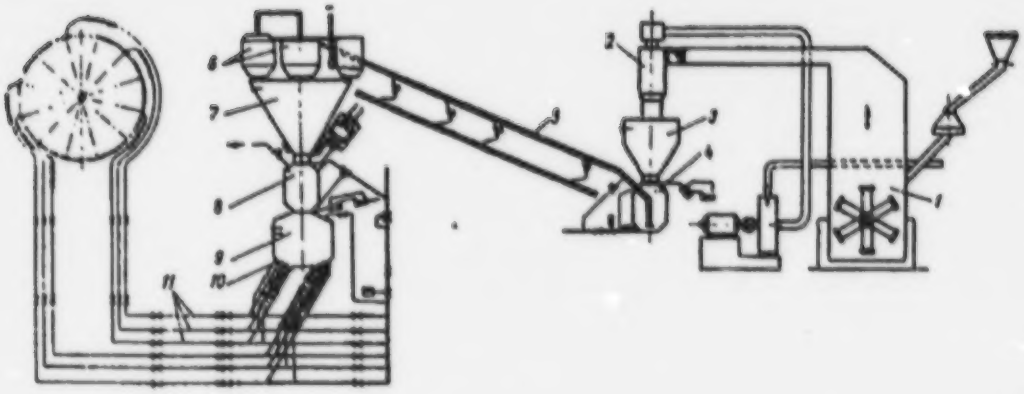


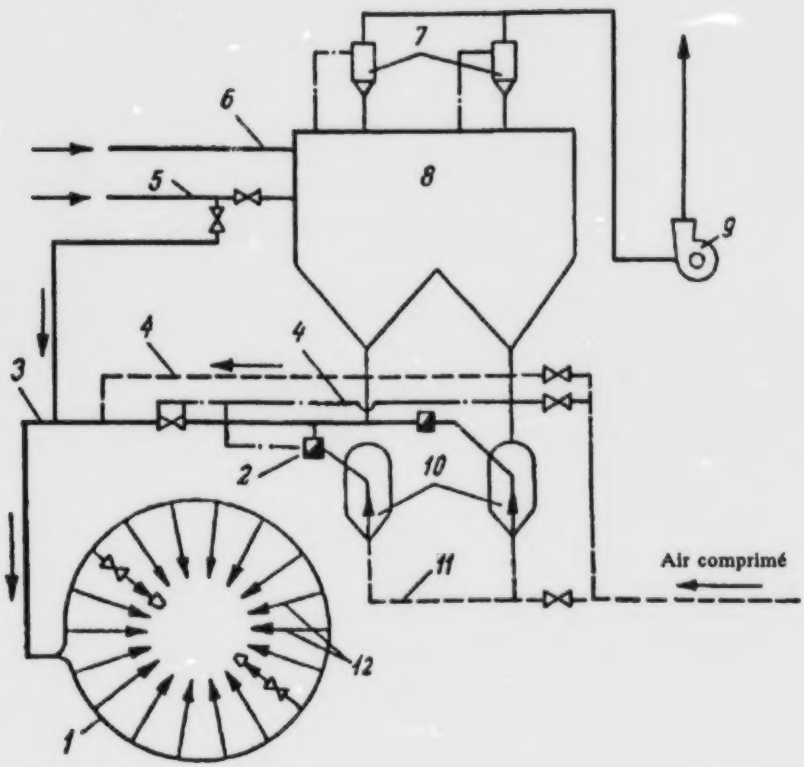
Fig. 39 – Sous-système d'injection chinois



Légende

1. Broyeur
2. Cyclone
3. Silo
4. Pompe à chambre
5. Canalisation de charbon pulvérisé
6. Cyclones
7. Silo
8. Réservoir intermédiaire
9. Réservoir d'alimentation
10. Dispositifs d'alimentation à disque
11. Canalisations d'alimentation des tuyères en charbon pulvérisé

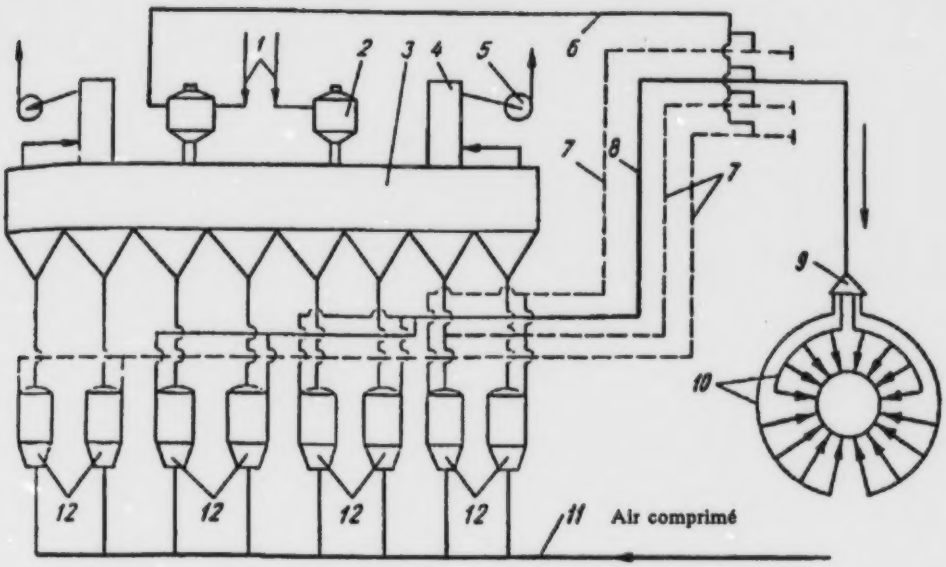
Fig. 40 – Système Doneck d'injection de charbon pulvérisé



Légende

1. Canalisation d'alimentation des tuyères en charbon pulvérisé
2. Vanne
3. Canalisation de charbon pulvérisé
4. Canalisation d'air comprimé
5. Entrée de CO_2
6. Entrée du charbon pulvérisé
7. Cyclones
8. Réservoir de stockage
9. Soufflante
10. Deux réservoirs d'injection parallèles
11. Entrée d'air comprimé
12. Tubes d'injection

Fig. 41 – Système Karaganda d'injection de charbon pulvérisé



Légende

1. Entrée du charbon pulvérisé
2. Filtre
3. Réservoir de stockage
4. Filtre
5. Soufflante
6. Recirculation
7. Canalisations de secours
8. Canalisations de charbon pulvérisé
9. Distributeur de charbon pulvérisé
10. Canalisation d'alimentation des tuyères
11. Canalisation d'air comprimé
12. Réservoir d'injection

Fig. 42 – Système Zaporozstal d'injection de charbon pulvérisé

Un des paramètres importants de l'alimentation pneumatique est la différence de pression entre le réservoir d'injection et le haut fourneau. Les dispositifs pneumatiques réagissent mieux aux irrégularités que les dispositifs mécaniques. Les systèmes nouvellement mis au point (1, 40, 48), en particulier, assurent une régulation précise de l'alimentation en charbon de chaque tuyère, en fonction des variations de pression. Toutefois, les systèmes pneumatiques ont tendance à être hauts et à exiger plus d'espace que les systèmes mécaniques. Les systèmes mécaniques, par contre, ont tendance à s'user plus vite, en raison du pouvoir abrasif des particules de charbon.

CARACTÉRISTIQUES DU COKE INFLUANT SUR L'INJECTION

CLASSIFICATION DES CHARBONS

Le système de classification des charbons utilisé en Amérique du Nord, établi par la American Society for Testing and Materials (ASTM), est basé sur l'analyse immédiate et calorifique. Souvent, les charbons sont simplement classés en deux catégories : métallurgiques et thermiques. Ces derniers comprennent les charbons non cokéfiables, les charbons cokéfiables oxydés et le charbon rejeté par les usines de préparation.

Le charbon est constitué d'éléments microscopiques que l'on appelle macéraux, qui se comportent différemment selon les conditions de réaction. Les macéraux sont identifiés au microscope par leur forme et leur réflectivité et sont divisés en trois grands groupes : vitrinite, inertinite et exinite. Ils peuvent également être classés d'après leur composition chimique fondamentale (59).

CARACTÉRISTIQUES DES CHARBONS

Pour l'injection dans les hauts fourneaux, on peut prendre un peu n'importe quel charbon. De ce fait, on a utilisé toutes les qualités industriellement, de l'anthracite au lignite (Tableau 1).

Bien que l'on puisse utiliser différentes qualités de charbon, les caractéristiques de celui-ci modifient les résultats. Les caractéristiques à prendre en considération sont : la teneur en hydrogène, en matières volatiles, en soufre, en phosphore, en eau et en cendres; la composition et la température de fusion des cendres; et la quantité de goudrons qu'ils peuvent fournir.

Effet de l'hydrogène

Du fait que la combustion de l'hydrogène fournit moins d'énergie au haut fourneau que la combustion du carbone, et que la réaction entre l'eau et le carbone pour donner de l'hydrogène est endothermique, l'injection de charbons contenant de l'hydrogène produit un changement considérable de l'équilibre énergétique dans la zone de combustion. Comme on l'a vu précédemment, on peut utiliser le rapport C/H pour déterminer si un combustible est injectable et, si oui, à quel taux et avec quel rapport de remplacement. Les données de Ridgion (62) et Cordier (63) présentées à la figure 43 (24) montrent la quantité de divers combustibles qui peuvent être injectés pour compenser une augmentation de 100°C de la température dans le haut fourneau tout en maintenant la TRAC constante. Plus le combustible a un rapport C/H élevé et plus on peut en injecter.

Le tableau 2 montre la relation entre le rang du charbon et le rapport C/H. On remarquera que ce rapport est pratiquement le même pour tous les charbons bitumineux et que les quantités injectées sont très voisines comme le montre la figure 43.

On peut en conclure que plus la teneur en hydrogène d'un charbon est faible et plus on peut en injecter pour maintenir la TRAC constante, à une température et une humidité constantes du vent.

Effet des matières volatiles

Les matières volatiles obtenues par pyrolyse des charbons sont principalement des gaz combustibles comme l'hydrogène, le monoxyde de carbone, le méthane et d'autres hydrocarbures. Des hydrocarbures lourds (goudrons), ainsi que des gaz incombustibles comme le dioxyde de carbone et la vapeur d'eau, font également partie des matières volatiles. Le rang du charbon influe notablement sur la composition des matières volatiles, et la proportion de gaz incombustibles augmente lorsque le rang baisse. La composition macérale modifie également la teneur en matières volatiles, l'exinite en produit davantage que la vitrinite qui, à son tour, en produit plus que l'inertinite.

Vu que la teneur en matières volatiles est liée au rapport C/H, comme nous l'avons vu plus haut, pour avoir l'injection maximale (et le rapport de remplacement le plus élevé) avec le minimum de refroidissement, il faut un charbon à faible teneur en matières volatiles. Par contre, si la teneur en matières volatiles est plus élevée, le charbon est plus combustible, ce qui est souhaitable lorsque la vitesse de réaction est un facteur important. En général, la combustibilité du charbon augmente avec le rang, notamment aux premiers stades (64). La quantité et la composition des matières volatiles sont également importantes du point de vue de la formation de suie dans certaines conditions (65, 66). On verra plus loin les effets de la teneur en matières volatiles et en goudrons sur l'efficacité de la combustion.

Effet des cendres

Contrairement aux combustibles liquides ou gazeux, le charbon contient souvent des quantités notables d'impuretés non combustibles. Les cendres sont les minéraux qui restent après incinération complète du charbon. Elles jouent un rôle important dans l'injection de charbon, laquelle dépend de leur quantité, de leur composition et de leur température de fusion.

Les charbons lavés ont généralement des teneurs en cendres de l'ordre de 5 à 10 %, bien qu'elles puissent atteindre 25 à 30 % (60). Une augmentation de la teneur en cendres des charbons injectés conduit à : a) une augmentation de la consommation de charbon, ce qui réduit le rapport de remplacement; b) une augmentation de la quantité de fondants requis; et c) une diminution de la production.

Les cendres ajoutent à la quantité de laitier produite par le haut fourneau. Celle-ci est en effet une fonction de la teneur en cendres, de la composition des fondants et de la basicité du laitier requise pour avoir un métal de qualité donnée. Habituellement, 1 kg de cendres de charbon conduit à 1,5 à 1,86 kg de laitier. En supposant que le rapport charbon/laitier soit de 0,6, chaque point de pourcentage de cendres consomme 0,9 à 1,08 % de carbone du charbon pour produire le laitier (24).

Tableau 1 – Types de charbons utilisés pour l'injection dans les hauts fourneaux

Type de charbon	Analyse (%)					
	Carbone fixe	Matières volatiles	Cendres	Humidité	S	Réf.
Anthracite	83,5	6,0	10,0	0,5	–	(9)
Anthracite	83,0	7,1	8,7	1,2	0,81	(12)
Bitumineux	46,5	19,3	33,0	1,2	1,08	(60)
Bitumineux	54,4	37,3	4,3	4,0	0,7	(29)
Lignite	41,0	44,0	4,0	11,0	0,5	(61)

Tableau 2 – Relation entre le rang du charbon et le rapport C/H

Rang du charbon	Rapport C/H (sec, sans cendres)
Anthracite	30,0
Bitumineux, faible teneur en volatiles	19,1
teneur faible à moyenne	17,8
moyenne teneur en volatiles	16,7
haute teneur en volatiles A	15,2
haute teneur en volatiles B	14,2
haute teneur en volatiles C	14,1

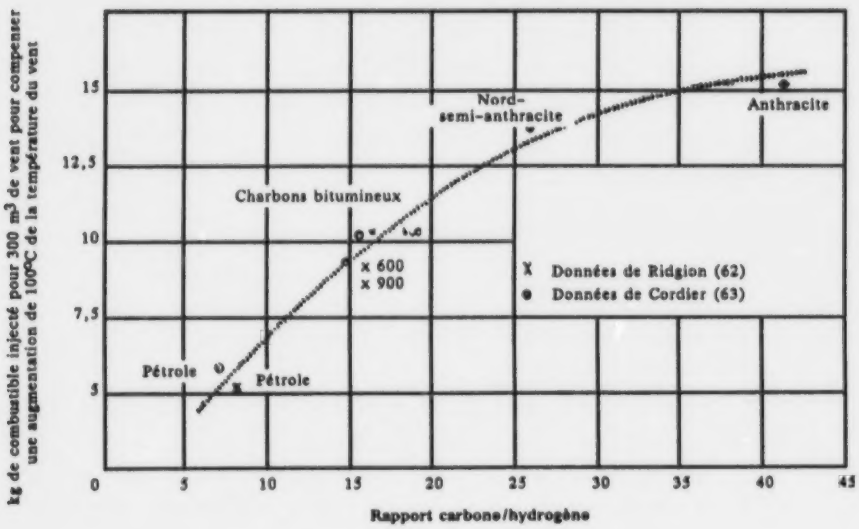


Fig. 43 – Relation optimale entre la quantité de combustible injecté et le rapport C/H

Fletcher et Garbee (29), lors d'essais grandeur réelle, ont relié empiriquement le rapport de remplacement à la teneur en cendres du charbon et du coke. Les calculs et une analyse des données de fonctionnement (67) confirment l'influence de la teneur en cendres sur le rapport de remplacement du coke (Fig. 44, Tableau 3).

La composition chimique des cendres de charbon se trouve généralement dans les limites suivantes :

SiO_2	40 - 90 %
Al_2O_3	20 - 60 %
Fe_2O_3	5 - 25 %
CaO	1 - 15 %
MgO	0,5 - 4 %
$Na_2O + K_2O$	1 - 4 %

Les charbons, parce qu'ils contiennent une variété de minéraux, ont des points de fusion variables et ils peuvent former du mâchefer (mélange de cendres fondues et non fondues avec du charbon imbrûlé) pendant la combustion. Le haut fourneau peut tolérer des charbons contenant une vaste gamme de minéraux dans les cendres, en raison de la température élevée et du laitier fondu, mais il est préférable que les cendres soient compatibles avec le laitier. Selon Ostrowski (68), si le laitier a une température de formation élevée et les cendres de charbon une température de fusion élevée (1 454°C) on peut avoir des problèmes de solidification du laitier, des cendres ou des deux. Pour éviter que la tuyère ne se bouche et que la charge accroche, Ostrowski recommande d'utiliser des charbons à faible teneur en cendres lorsque le point de fusion est bas. Il recommande également d'équilibrer Mg et Al dans le haut fourneau pour avoir la température de formation du laitier la plus basse possible (68).

La température de formation du laitier est certainement importante, mais la température de fusion des cendres du charbon injecté semble l'être moins. Le laitier de cendres de charbon, formé directement dans la zone de la tuyère, devrait tomber dans le creuset et ne pas avoir d'effet sur la tuyère ou la perméabilité au gaz de la charge.

Effet du soufre

La teneur en soufre des charbons peut aller de moins de 1 % à 10 % ou plus, et ce soufre peut être organique ou minéral. Le soufre du charbon injecté a le même effet que le soufre du métal introduit avec la charge. Son élimination ne constitue pas un problème technique, car le laitier est considéré comme un bon fixateur du soufre. Néanmoins, si l'injection de charbon augmente la quantité de soufre dans le haut fourneau, il en résulte des frais additionnels, car le volume du laitier augmente, sa basicité est modifiée et il faut parfois prendre d'autres mesures de désulfuration pour maintenir la stabilité chimique de la fonte.

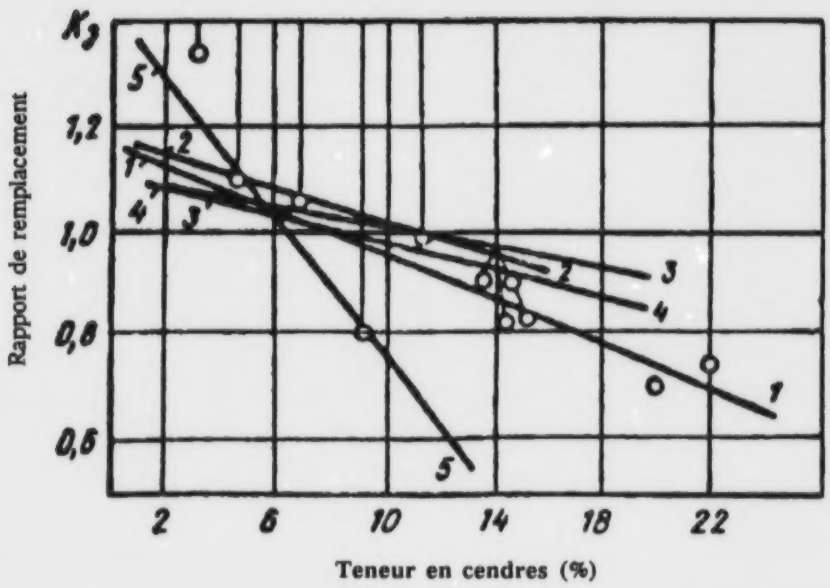


Fig. 44 – Rapport de remplacement en fonction de la teneur en cendres
1. Données expérimentales; 2. Calculs de Yaroshewskii;
3. Calculs selon l'équilibre du carbone; 4. Calculs de Ramm;
5. Calculs de Garbee.

Tableau 3 – Relation entre le rapport de remplacement et le type de charbon

Société	Rapport de remplacement	Type de charbon	Conditions de fonctionnement
Kobe (Japon)	1,0	32–35 % MV 7–10 % Cendres	Diminution humidité du vent Taux d'injection : 50 kg/t_f*
Stanton (R.-U.)	1,0	35 % MV 6 % Cendres	Augmentation temp. du vent Taux d'injection : 74 kg/t_f*
British Steel Corporation (R.-U.)	0,9	32 % MV 4 % Cendres	Charbon granulaire Taux d'injection : 51 kg/t_f*
Aciéries Shoudu (Chine)	0,8 0,7	Anthracite Teneur moyenne en cendres Anthracite Haute teneur en cendres	Taux d'injection : 70–120 kg/t_f* Taux d'injection : 70 kg/t_f*
Karaganda (URSS)	0,6	18 % MV 32 % Cendres	Taux d'injection : 50–80 kg/t_f*

* $t_f = t_{fonte}$

Effet de l'humidité

Une augmentation de 1 % de l'humidité d'un charbon réduit la quantité totale de charbon pouvant être injectée de 1,6 à 2,6 % pour les charbons bitumineux et de 0,85 % pour les anthracites (24). Il est également recommandé d'avoir une humidité inférieure à 1 % pour avoir un écoulement régulier du charbon lors du transport pneumatique. L'humidité du charbon peut être reliée à l'humidité de constitution, comme le montrent les données de la figure 45 (23). Selon ces données, l'humidité du charbon pulvérisé augmente en même temps que l'humidité de constitution.

Effet des alcalis

Le charbon injecté peut être une importante source de contamination par l'oxyde de potassium (K_2O) et l'oxyde de sodium (Na_2O). Ces oxydes sont partiellement réduits à l'état métallique dans la partie inférieure du haut fourneau : ils s'élèvent, se réoxydent et se solidifient, puis ils redescendent avec la charge. Ce phénomène conduit à une accumulation du sodium et du potassium dans le haut fourneau, ce qui nuit au mouvement des gaz dans la charge et augmente la réactivité et la destruction du coke en catalysant la réaction de régénération du CO. Les alcalis ont aussi pour effet de détériorer les parois réfractaires du haut fourneau.

L'élimination des alcalis avec le laitier exige l'abaissement de la basicité et de la température dans la zone de combustion, des conditions contraires à celles nécessaires pour obtenir une fonte à faible teneur en soufre.

Effet de la facilité de broyage

Les charbons faciles à broyer coûtent moins cher à préparer pour l'injection. La relation entre la facilité de broyage et le rang fait l'objet de la figure 46 (59). Les charbons bitumineux pauvres et moyens sont les plus faciles à broyer, mais cette relation est trop approximative pour que l'on puisse estimer la facilité de broyage à partir des résultats d'analyse.

Effet de la granulométrie

La taille des particules de charbon est une considération importante pour obtenir non seulement une combustion efficace et un bon fonctionnement du haut fourneau, mais aussi pour les investissements et les frais d'exploitation. Bien que le charbon pulvérisé soit celui qui permette la combustion la plus efficace au taux d'injection maximal, les charbons plus grossiers ont de nombreux avantages économiques. On ne connaît pas exactement la granulométrie idéale des charbons à injecter, mais on estime généralement que 80 % de ceux-ci doivent être acceptés au tamis de maille 200.

Toutefois, la British Steel Corporation a pratiqué avec succès l'injection de charbon granulaire à Scunthorpe (53, 54). Des unités expérimentales ont fonctionné avec des particules : maille 200, 1,00 mm, 3,00 mm.

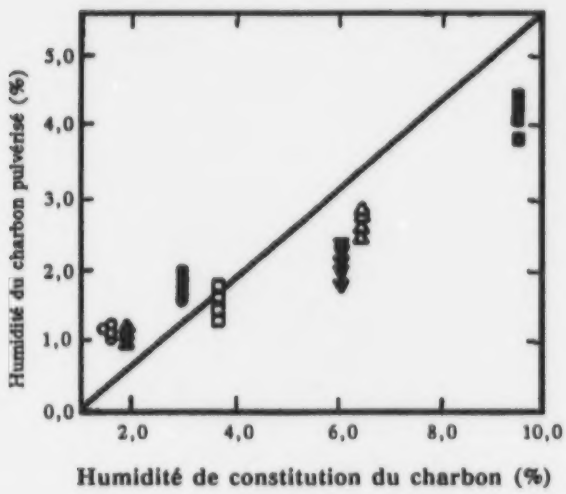


Fig. 45 – Humidité de constitution d'un charbon en fonction de l'humidité de son produit pulvérisé

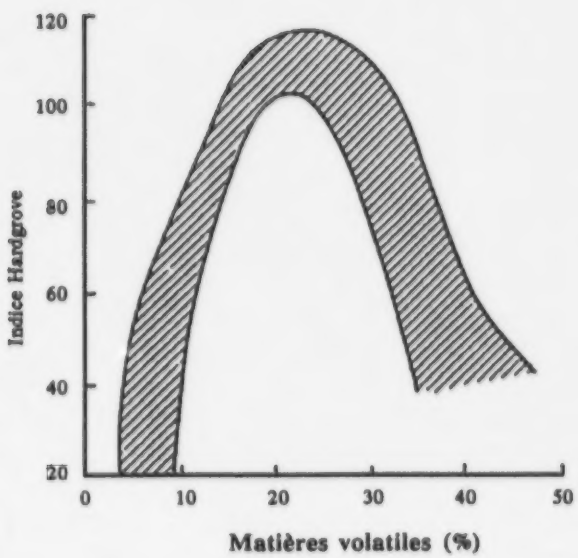


Fig. 46 – Relation entre l'indice de broyage Hardgrove et la teneur en matières volatiles

On n'a pas eu de problèmes avec des charbons partiellement granulaires (25 %) à haute teneur en matières volatiles (37 %). Les principaux indicateurs de fonctionnement et l'efficacité de la combustion, à l'échelle pilote et grandeur réelle, étaient comparables à l'ICP. Le taux d'injection de charbon granulaire était de 30 à 76 kg/t_{fonte} et le rapport de remplacement du coke de 0,94. Les résultats montrent que c'est là une technique efficace et intéressante sur le plan économique, qui a aussi l'avantage de diminuer les strictes mesures de sécurité que l'on doit prendre avec le charbon pulvérisé.

RÉSUMÉ

Les caractéristiques normalement acceptées pour les charbons à injecter dans les hauts fourneaux peuvent être résumées ainsi :

• teneur en cendres	<10 %
• teneur en soufre	<1 %
• facilité de broyage Hardgrove	>40
• température de fusion des cendres	<1 250°C (68) ou <1 400°C
• granulométrie	80 % maille <200 80 % <2 mm

Bien que la finesse du charbon favorise l'efficacité de la combustion, l'intérêt économique du charbon granulaire justifie d'autres recherches pour voir quelle serait la taille minimale qui répondrait à la fois aux besoins de combustion rapide et aux impératifs économiques.

La teneur en matières volatiles acceptable dépend du procédé utilisé dans le haut fourneau. Pour un taux d'injection élevé on préfère les charbons à faible teneur en matières volatiles, bien que celles-ci et leur composition jouent aussi un rôle important dans l'efficacité de la combustion.

Il est bon de résumer ce que disaient des chercheurs chinois qui comparaient de l'anthracite et du charbon bitumineux pour l'injection dans des hauts fourneaux (28).

Sécurité – L'utilisation de charbon bitumineux pulvérisé, sujet à l'inflammation spontanée et à l'explosion, exige des mesures de sécurité spéciales comme l'introduction de gaz inertes et des capteurs de température. L'injection d'anthracite n'exige pas de gaz inerte.

Facilité de broyage – Un broyeur à boulets était 13 % plus efficace avec le charbon bitumineux qu'avec l'anthracite.

Facilité de transport – Aux aciéries de Shoudu (Chine), la vitesse de transport du charbon bitumineux (30 % de MV) était 25 à 30 % supérieure à celle de l'anthracite.

Taux d'injection maximal – Selon l'expérience chinoise, le taux d'injection maximal des charbons bitumineux est 5 % inférieur à celui de l'anthracite.

Rapport de remplacement – Contrairement aux considérations théoriques, le rapport de remplacement du coke par le charbon bitumineux s'est révélé 10 % supérieur à celui de l'anthracite.

COMBUSTION DU CHARBON

GÉNÉRALITÉS

La combustion du charbon injecté commence dans le porte-vent et se termine dans la cavité (voir Fig. 6). Il est important pour un combustible solide qu'il brûle dans la cavité, autrement il causerait des problèmes de fonctionnement, car il réduirait la perméabilité de la charge et augmenterait le taux de charbon requis. Le charbon imbrûlé est extrait du haut fourneau avec les gaz évacués ou avec le laitier. Le temps de séjour d'une particule de charbon dans le porte-vent, la tuyère et la cavité est de l'ordre de 10 ms, ce qui est beaucoup plus court que dans les autres systèmes utilisant du charbon pulvérisé. De nombreuses recherches expérimentales (21, 34, 53, 54, 64, 69-78) et théoriques (69, 78-82) ont porté sur la combustion dans le système porte-vent, tuyère et cavité. Sauf pour les études faites au Royaume-Uni (53, 54), toutes portaient sur la combustion du charbon pulvérisé, c'est-à-dire celui dont 80 % est de maille 200.

REPRÉSENTATION PHYSIQUE

La combustion des particules de charbon peut être considérée comme un processus multiphases comprenant le chauffage, le dégagement des matières volatiles, l'inflammation, la combustion de la phase gazeuse et la combustion hétérogène. Ces phases peuvent se recouper et se dérouler en parallèle pendant la combustion. La figure 47 représente les différentes phases de la combustion d'une particule de charbon injectée dans le porte-vent d'un haut fourneau. L'eau et les matières volatiles se dégagent les premières (phase 1), viennent ensuite le monoxyde de carbone et l'hydrogène (phase 2), par réaction de l'eau gazeuse. Quelques millièmes de seconde plus tard, la température de la surface s'est suffisamment élevée pour qu'il y ait inflammation (phase 3) et combustion (phase 4) du charbon gazeux.

Le dégagement des matières volatiles du charbon (pyrolyse) est un phénomène important influant sur l'efficacité de la combustion (83). La quantité de matières volatiles et leur composition pour un charbon donné varient avec la rapidité de l'élévation de température, la durée de la décomposition et la température finale atteinte. Au début, les matières volatiles libérées peuvent réagir entre elles ou avec le produit carbonisé qui reste. Le rendement en matières volatiles et leur composition dépendent, en partie, de la vitesse à laquelle elle sont extraites du résidu solide.

La pyrolyse à plus haute température ou à un rythme de chauffage plus élevé (10^3 à 10^{6}°C/s) laisse moins de résidus de matières volatiles dans le matériau carbonisé (84-86), comme le montre la figure 48 (84) et produit plus de matières volatiles et de goudrons que la pyrolyse lente ou l'analyse immédiate (87).

La figure 49 (84) montre que les matières volatiles dégagées lors de la pyrolyse rapide ont des rapports C/H plus élevés que ceux que l'on trouve à l'analyse immédiate et les premiers produits dégagés contiennent plus de carbone que ceux qui se dégagent plus tard. Le type de charbon influe aussi beaucoup sur la nature des produits de pyrolyse (65, 66, 88-91), comme le montrent les tableaux 4 (84) et 5 (91).

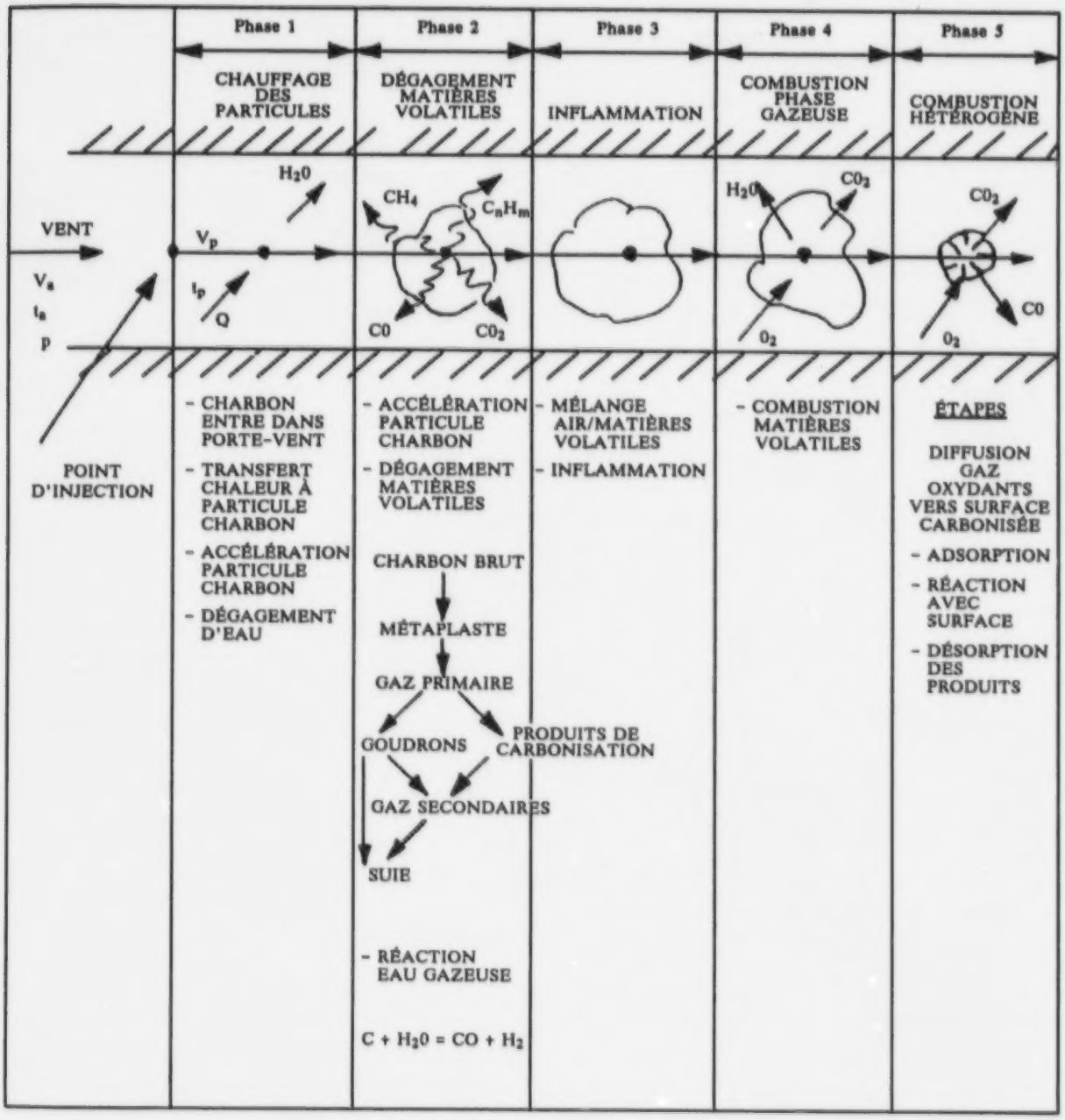


Fig. 47 – Représentation physique de la combustion du charbon

Tableau 4 – Produits apparents de la pyrolyse rapide à 1 027°C

Charbon	Gaz ambiant	Produits, % en masse				
		Goudrons	CH_4	H_2	C_2–C_4	CO et CO_2
Bitumineux	Vide	<9,9	50,3	13,1	–	26,7
Bitumineux	O_2	–	8,0	59,0	–	26,7
Bitumineux	Vide	53,0	<6,0	<31,0	<3,0	<8,0
Lignite	H3	13,0	3,0	1,0	<3,0	38,0

Tableau 5 – Rendement en produits de pyrolyse des charbons canadiens (essai de Fischer)

Charbon	Produits, % en masse		
	Goudrons	Gaz	Carbonisé
Canmore	0,7	2,6	93,5
McIntyre	3,3	4,8	89,0
Byron Creek	7,0	5,0	82,0
Sukunka	4,9	6,0	86,2
Balmer	5,7	3,9	88,5
Coalspur	8,4	6,1	69,8
Shaughnessey	9,4	6,9	66,6
Devco	13,5	7,4	73,2
Prince	9,9	7,3	72,8
E. Blackfoot	3,2	10,3	64,7
Bienfait*	2,9	11,4	47,4
Onakawana*	3,0	14,2	71,9

*Lignites

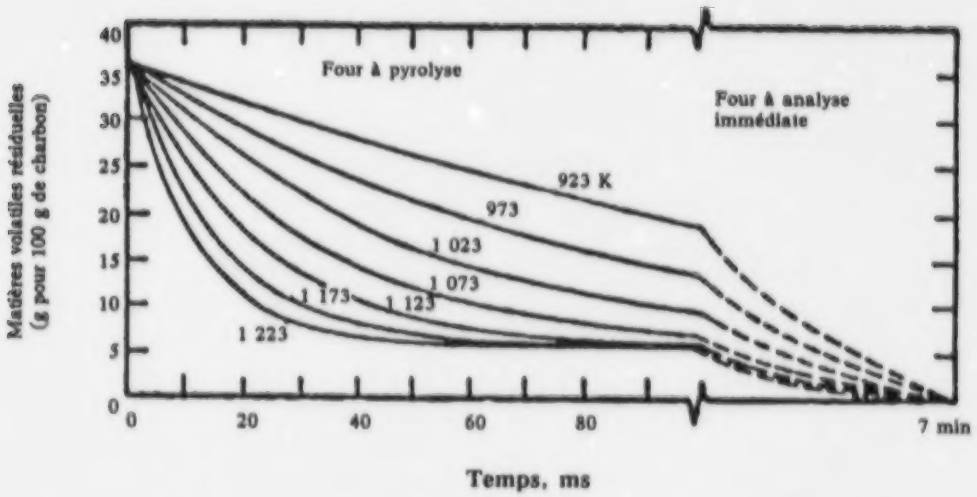


Fig. 48 – Courbes typiques de dégagement des matières volatiles pour un charbon à haute teneur à différents taux de chauffage

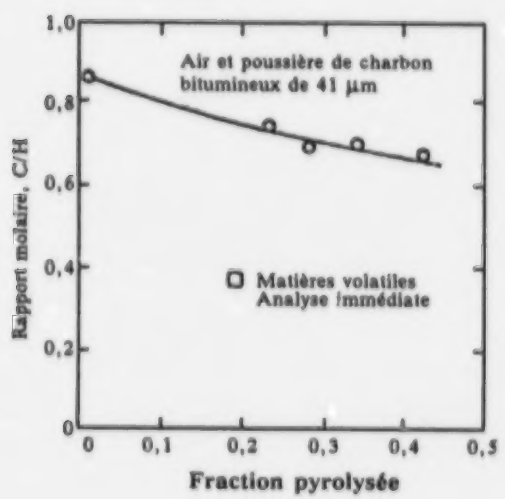


Fig. 49 – Rapport C/H en fonction de la fraction pyrolysée

L'inflammation marque le début de la combustion de la phase gazeuse. La figure 50 montre l'effet du temps, de la température du vent et de la taille des particules sur la température superficielle d'un charbon.

La température d'inflammation dépend de la fraction combustible des matières volatiles, comme on peut le voir à la figure 51 (93). Après l'inflammation, les transferts de chaleur augmentent considérablement, intensifiant le dégagement de matières volatiles et la combustion.

Le modèle le plus simple suppose que toutes les matières volatiles sont dégagées avant l'inflammation. En réalité, il peut y avoir une combustion superficielle avant que le dégagement ne commence vraiment, mais elle est arrêtée par les matières volatiles qui empêchent l'oxygène de parvenir jusqu'à la surface (94). Le produit carbonisé restant après le dégagement est fait surtout de carbone, de cendres et de matières volatiles résiduelles.

On considère que le produit carbonisé brûle de la façon suivante :

- diffusion des gaz oxydants vers la surface
- adsorption
- réaction avec la surface
- désorption de produits.

Les réactions hétérogènes de la matière carbonisée avec les gaz oxydants (oxygène, vapeur d'eau ou dioxyde de carbone) sont celles qui prennent la majorité du temps de combustion d'une particule. Les vitesses d'oxydation du carbone par la vapeur d'eau ou le dioxyde de carbone sont généralement inférieures à celle de l'oxydation par l'oxygène lui-même (84). Par ailleurs, les formes les plus pures de carbone sont généralement les moins réactives (84). Les matières carbonisées de charbons de rang inférieur sont plus réactives que celles des charbons de rang plus élevé (84). Les matières carbonisées ayant une grande surface interne ont des vitesses de réaction plus élevées.

FACTEURS INFLUANT SUR L'EFFICACITÉ DE LA COMBUSTION

Emplacement de la lance d'injection

L'emplacement du point d'injection est un facteur de l'efficacité de la combustion (1, 19-21, 34, 68, 95). Si le point d'injection est dans le porte-vent, une grande partie du charbon brûle dans celui-ci. La distance entre la tuyère et le point d'injection est critique. L'efficacité de la combustion augmente et atteint son maximum lorsque l'on déplace le point d'injection vers l'amont. Si on remonte trop loin, des cendres peuvent se déposer dans le porte-vent et gêner le mouvement des gaz (Fig. 52) (34).

La position exacte du point d'injection dépend du type de charbon, de la température du vent, de la taille des particules et de la conception de la lance. À Weirton (National Steel Corp., É.-U.) (68), par exemple, l'extrémité de la lance d'injection était à 1 015 mm de la tuyère pour un charbon à 39 % de MV et 5,9 % de cendres.

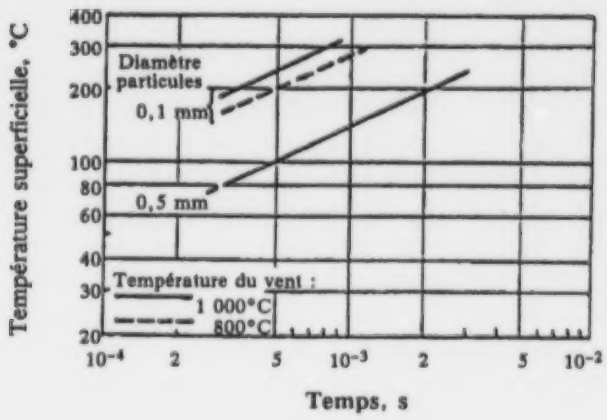


Fig. 50 – Température superficielle en fonction du temps, de la température du vent et du diamètre des particules

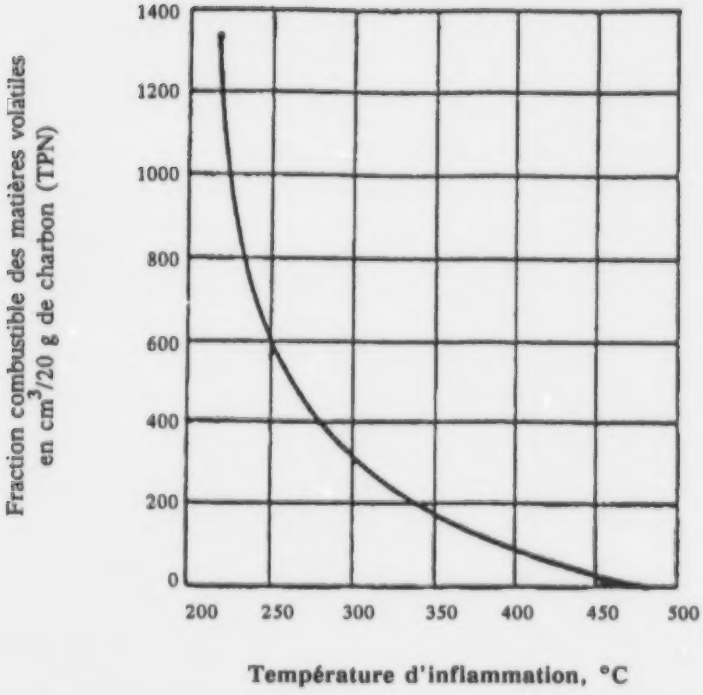


Fig. 51 – Relation entre la fraction combustible des matières volatiles et la température d'inflammation

Type de charbon

Les charbons à haute teneur en matières volatiles sont considérés comme ayant une meilleure combustibilité que les autres charbons utilisés pour l'injection dans les hauts fourneaux (36, 64, 74, 78, 96, 97). Suzuki et ses collègues ont étudié l'efficacité de la combustion de divers charbons dans un haut fourneau expérimental. Comme on peut le voir à la figure 53 (96), ils ont constaté que 1,80 m en face de la tuyère la combustion était complète à 80 % pour les charbons à faible teneur en matières volatiles (20,2 %) et à 90 et 95 % pour des charbons à plus haute teneur (33,2 et 39,8 %, respectivement). La Nippon Kokan a également constaté que les charbons à haute teneur en matières volatiles brûlaient mieux. Les taux d'injection dans un haut fourneau expérimental de 3,6 m^3 étaient de 100 à 200 kg/t_{fonte} et la température du vent de 1 000 à 2 000°C (98). Les résultats montrent que 96 % des charbons à haute teneur en matières volatiles (40 %) brûlaient dans le porte-vent, tandis que ce chiffre descendait à 66 % pour les charbons à 26 % de MV. Narita et coll. (77) ont constaté la même tendance.

D'autres études, effectuées par la International Flame Research Foundation (IFRF) (64, 74) dans un haut fourneau expérimental, ont permis d'examiner les effets de la teneur en matières volatiles (4,1 à 37 %), du rapport stoechiométrique (1,0 à 2,0), de la température du vent (933 à 1 218°C) et de la grosseur des particules. On a utilisé les charbons suivants :

P (4,1 % MV; 3,9 % cendres)
NP (15,9 % MV; 10,8 % cendres)
ECN (30,9 % MV; 6,3 % cendres)
AR (37,7 % MV; 3,3 % cendres)

Selon ces recherches, la teneur en matières volatiles est ce qui influe le plus sur la combustion comme le montre le pourcentage brûlé et la température des gaz à la figure 54 (64). On a également constaté des différences dans l'aspect de la flamme. Le charbon ECN produisait une flamme plus brillante (donc contenant plus de suie) que le charbon AR.

Selon des chercheurs japonais (99), il y a des différences notables dans les conditions de combustion entre un haut fourneau expérimental et un haut fourneau réel en raison des changements rapides de température et de composition des gaz dans la zone de la cavité et de la combustion simultanée du coke et du charbon pulvérisé.

Après une analyse des échantillons de charbons prélevés aux aciéries Chiba, ont a avancé que l'efficacité finale de la combustion dans un haut fourneau dépend plus de la combustion du produit carbonisé que de celle de la phase gazeuse (99).

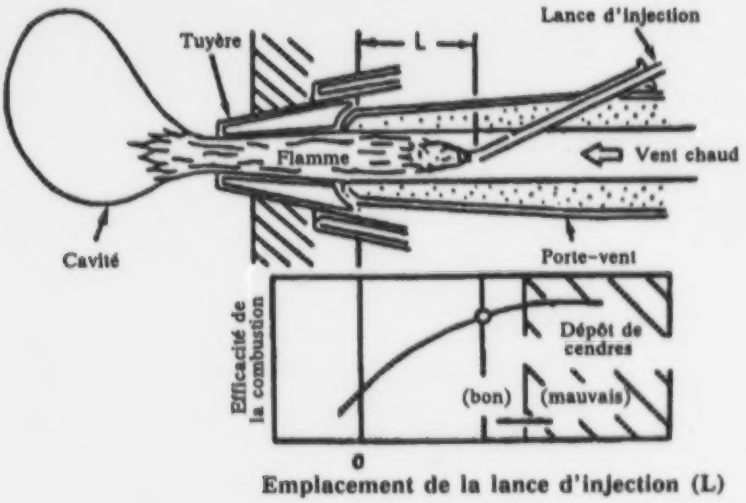


Fig. 52 – Effet de l'emplacement de la lance d'injection sur l'efficacité de la combustion et le dépôt de cendres

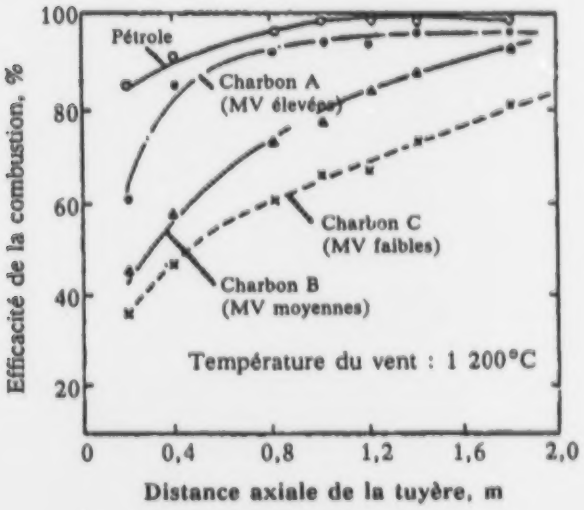
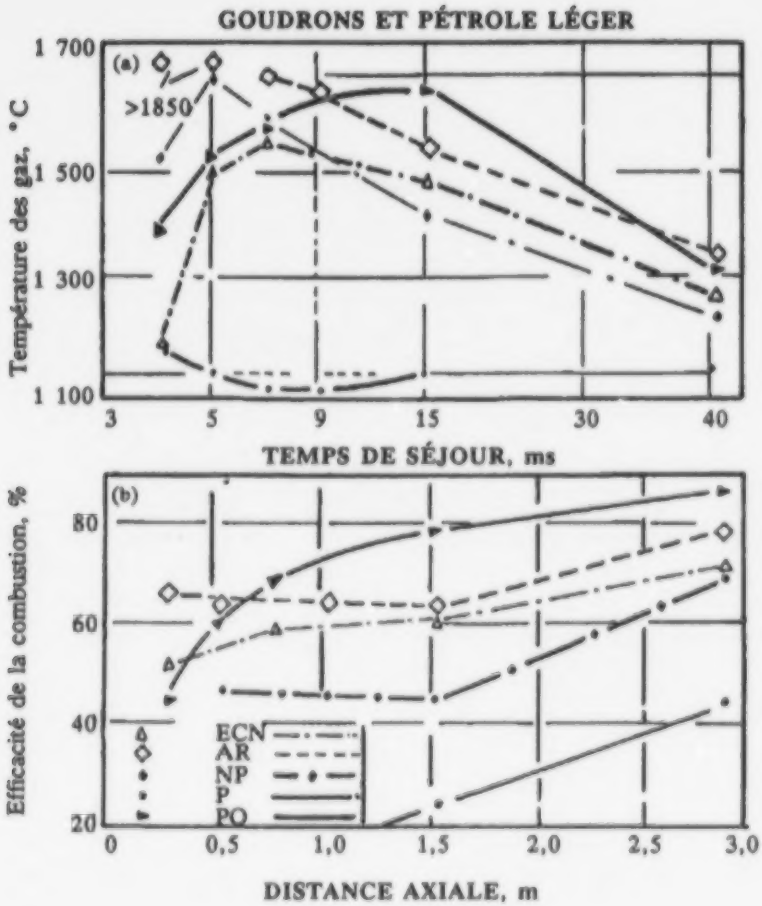


Fig. 53 – Relation entre le type de combustible et l'efficacité de la combustion



Charbon testés :

ECN	=	30,9 % matières volatiles
	=	6,3 % cendres
AR	=	37,7 % matières volatiles
	=	3,3 % cendres
NP	=	15,9 % matières volatiles
	=	10,8 % cendres
P	=	4,1 % matières volatiles
	=	3,9 % cendres

PO = Pétrole lourd

Fig. 54 – Variation des paramètres de combustion avec le combustible injecté

Rapport stoechiométrique/taux d'injection

Le rapport stoechiométrique est le rapport de la quantité d'air fournie à celle théoriquement nécessaire pour transformer complètement le charbon en dioxyde de carbone, en eau et en dioxyde de soufre. Selon les travaux publiés (19, 21, 75), il y a des relations empiriques entre l'efficacité de la combustion et le taux d'injection ce qui, de fait (à un volume de vent constant) relie indirectement l'efficacité de la combustion au rapport stoechiométrique. Toutefois, les considérations sur l'efficacité de la combustion en fonction du taux d'injection de charbon ne disent rien des conditions de combustion, à moins qu'on ne connaisse le volume de vent. Sans renseignements complets il est difficile d'analyser et de comparer les nombreux systèmes de combustion décrits dans la littérature.

La figure 55 (21) contient des données expérimentales sur trois charbons ayant des teneurs différentes en matières volatiles (36,7 %, 17,7 % et 5,7 % pour les charbons A, C et D, respectivement) qui relient l'efficacité de la combustion au taux d'injection, à volume de vent constant. Cette figure montre qu'une augmentation du taux d'injection, qui à volume de vent constant réduit le rapport stoechiométrique, diminue l'efficacité de la combustion. Le tableau 6 et d'autres publications confirment que l'augmentation du rapport stoechiométrique améliore la combustion. Le tableau 6 montre que modifier le rapport stoechiométrique change davantage la combustion en aval que dans les premières phases (64).

Paramètres du vent (température, pression, taux d'oxygène)

Des études expérimentales faites dans un certain nombre de pays montrent que l'augmentation de la température du vent (1, 64, 74, 75, 96, 98, 100), de la pression du vent (76) et de sa teneur en oxygène (64, 74, 75) permet d'utiliser plus de charbon. Comme on peut le voir à la figure 56 (75), l'enrichissement en oxygène améliore l'efficacité de la combustion. L'influence de la température du vent est évidente dans la plage 1 000–1 100°C (Fig. 57) (1). La figure 58 (76) montre que l'augmentation de la pression améliore aussi la combustion jusqu'à 3 kg/cm^2.

Granulométrie

Comme on peut le voir à la figure 59 (1) la finesse des particules améliore le taux de combustion (1, 35, 74–77). Selon Bortz (74) la finesse des particules n'a pas beaucoup d'effet sur le dégagement des matières volatiles, mais elle améliore la combustion du produit carbonisé, ce qui fait que la combustion complète est plus rapide. À un faible rapport stoechiométrique (1,0), une granulométrie plus fine n'a pas d'avantages tant que la particule n'est pas à 1,5 m du point d'injection (région de combustion du produit carbonisé). Toutefois, pour un rapport stoechiométrique de 2,0 l'effet s'observe plus près du point d'injection (74).

On semble généralement admettre que plus les particules de charbon sont fines plus elles brûlent efficacement et tous les hauts fourneaux, à l'exception de ceux de la British Steel Corporation, utilisent du charbon pulvérisé (80 % maille 200). Selon la British Steel (53, 54) l'utilisation de charbon granulaire (98 % 2,0 mm) permet de parvenir à des conditions et une efficacité de combustion comparables à celles obtenues avec du charbon pulvérisé.

Tableau 6 – Conditions expérimentales

Flamme n°	Temp. vent, °C	Débit vent, kg/h	Vitesse vent, m/s	Type charbon	Taux charbon, kg/h	Rapport stoechio-métrique	O_2 vent, %	Pourcentage consumé 1,0 m (10 m/s)	Pourcentage consumé 1,5 m (15 m/s)
F13	1 164	2 977	211	ECN*	290	0,98	21,5	--	59
F15	1 185	2 841	205	ECN	290	0,94	21,0	--	62
F25	1 188	2 978	213	ECF**	280	1,02	21,2	54	61
F22	1 030	3 335	216	ECN	310	1,03	21,3	64	63
F40	1 012	3 367	214	ECN	300	1,08	23,0	61	64
F18	1 177	3 058	220	ECN	140	2,10	21,3	61	77
F26	1 179	3 033	217	ECF	150	1,94	21,2	74	81
F23	1 011	3 332	213	ECN	150	2,14	21,1	60	72

*Charbon d'Elk Creek, broyage normal
**Charbon d'Elk Creek, broyage fin

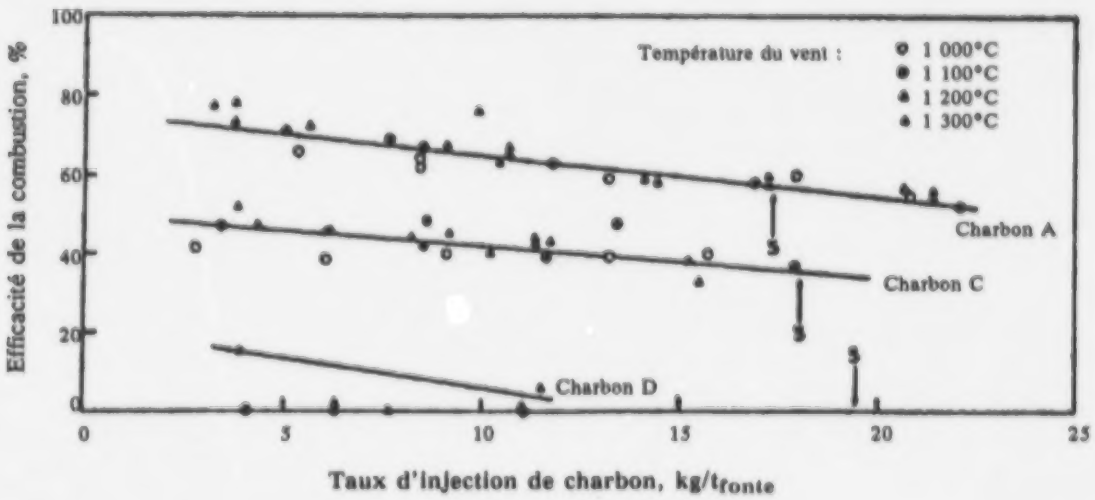


Fig. 55 – Efficacité de la combustion en fonction du taux d'injection de charbon

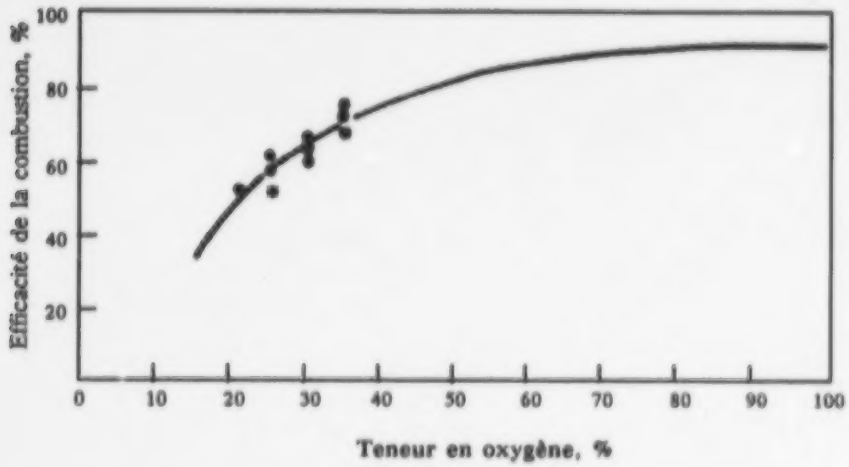


Fig. 56 - Relation entre la teneur du vent en oxygène et l'efficacité de la combustion

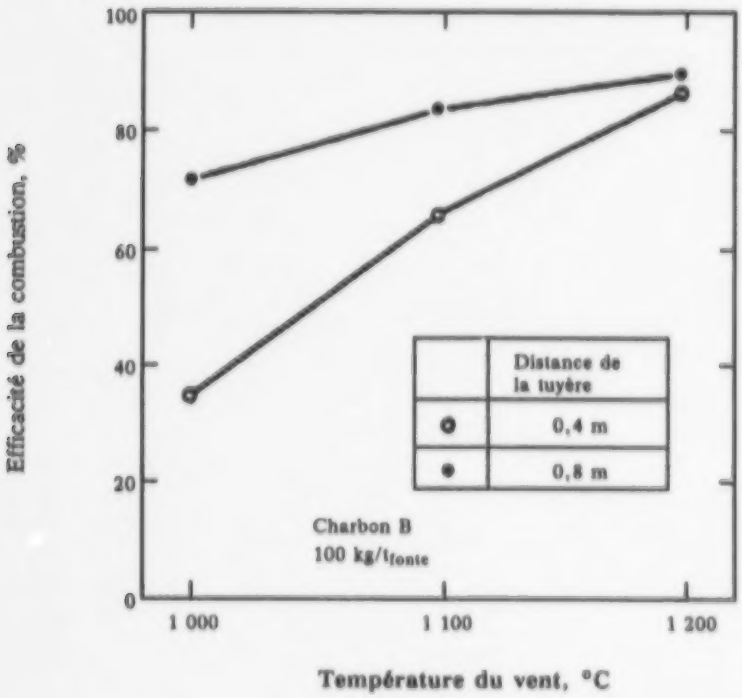


Fig. 57 - Efficacité de la combustion en fonction de la température du vent

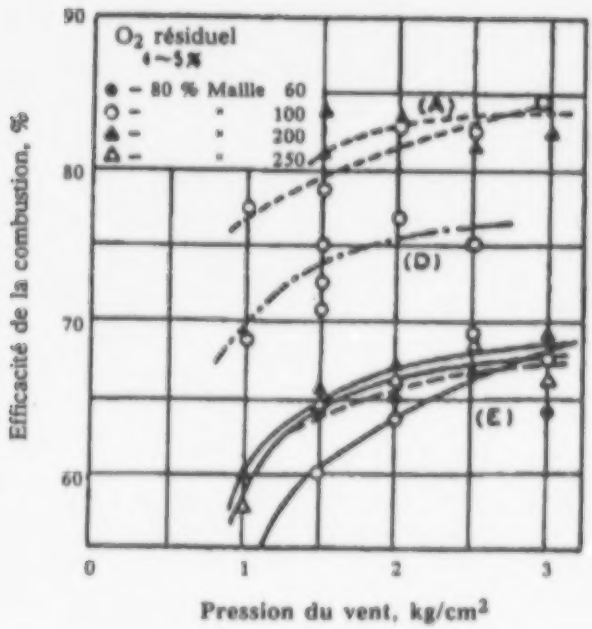


Fig. 58 – Efficacité de la combustion en fonction de la pression du vent

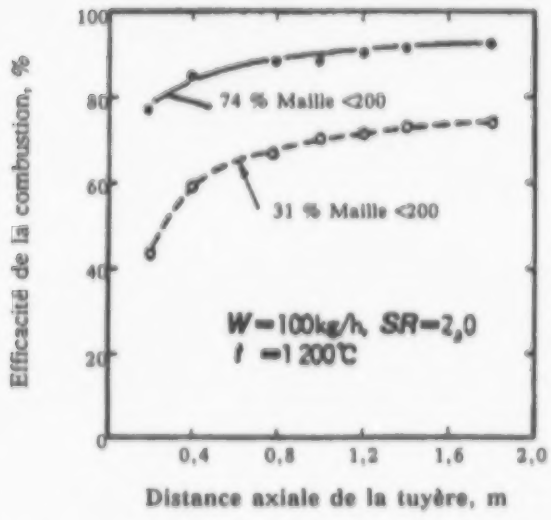


Fig. 59 – Relation entre l'efficacité de la combustion et la granulométrie

Composition macérale

Les caractéristiques de combustion des charbons sont souvent attribuées à leur composition macérale (101–105). En particulier, une teneur élevée en macéraux inertes a été reliée à des niveaux élevés de carbone imbrûlé (101, 103). Lorsqu'on brûle un charbon bitumineux riche en vitrinite, le comportement est différent dans la phase de dégagement des matières volatiles et dans celle de combustion des gaz. La perte apparente de matières volatiles et l'efficacité de la combustion sont plus élevées qu'avec un charbon riche en inertinite (104). La combustion de la matière carbonisée, par contre, semble similaire.

MODÈLES MATHÉMATIQUES

On a mis au point des modèles mathématiques pour évaluer et prévoir les conditions optimales d'injection de charbon dans un haut fourneau (78–81). Dans le modèle de Burgess et coll. (78) le dégagement des matières volatiles, la combustion de ces matières et la combustion de la matière carbonisée sont considérés comme des processus séparés. Ce modèle simule la combustion pauvre en combustible du charbon pulvérisé dans le porte-vent d'un haut fourneau.

Un autre modèle mathématique, préparé à l'université de Newcastle (Australie) (79), couvre la combustion jusqu'à la cavité du haut fourneau. Ce modèle prédit l'effet des changements du taux d'injection et de l'utilisation de divers charbons, quelle que soit leur teneur en matières volatiles. Ce modèle tient compte du chauffage des particules, de leur vitesse, du dégagement des matières volatiles, des réactions hétérogènes, de la réaction au niveau du lit de coke, du mélange et de la combustion en phase gazeuse, de la température des gaz et de leur composition.

Nomura et McCarthy (80) ont mis au point un modèle de la combustion du charbon pulvérisé dans un haut fourneau en supposant :

- deux zones physiques (réchauffage et combustion);
- un écoulement adiabatique, unidimensionnel; et
- une distribution uniforme des particules de charbon dans une section du porte-vent.

Leur modèle définit : a) la position d'une particule au temps t dans le porte-vent (zone de réchauffage); b) le temps qu'il faut avant que cette particule s'enflamme; c) le temps qu'il faut avant que la particule atteigne la tuyère; et d) le taux de combustion. Ce modèle a été utilisé pour prévoir les taux de combustion de divers charbons.

Les principales conclusions que l'on peut tirer de ces modèles sont au nombre de quatre :

1) La température des gaz dans le porte-vent augmente du fait de la combustion; les courbes de température des gaz, après une augmentation marquée en raison du dégagement des matières volatiles et de la combustion de la phase gazeuse, plafonnent lorsque la combustion hétérogène domine; les profils de températures pour les charbons à haute teneur en matières volatiles augmentent plus rapidement que ceux des charbons plus maigres, particulièrement aux taux d'injection élevés.

2) La combustion est plus complète pour les charbons à plus haute teneur en matières volatiles.

3) L'efficacité de la combustion est considérablement modifiée par les changements de température du vent; plus la température initiale est élevée et plus la combustion est efficace.

4) Plus le taux d'injection est élevé et moins la combustion est complète.

Les résultats des modèles mathématiques ne sont pas toujours en accord avec les résultats des expériences sur des hauts fourneaux réels (99). Dans le modèle de Burgess et coll. (78), par exemple, l'efficacité de la combustion augmente avec le taux d'injection. De plus, les modèles mathématiques traitent les matières volatiles comme des matières non décomposables, alors que l'on a prouvé expérimentalement qu'elles sont décomposées pendant la combustion. De ce fait, il y a production de goudrons et de suie qui nuisent à l'efficacité de la combustion et diminuent la quantité brûlée (comme on le verra ci-dessous).

SOMMAIRE

L'efficacité de la combustion du charbon injecté dans un haut fourneau peut être améliorée en augmentant :

- le rapport stoechiométrique
- la température du vent
- la teneur du vent en oxygène
- la pression du vent (jusqu'à 300-400 kPa); et

en diminuant :

- la granulométrie du charbon
- le taux d'injection du charbon (à volume de vent constant).

On considère qu'une haute teneur en matières volatiles (faible rapport C/H) est un facteur favorisant une haute efficacité de combustion, particulièrement au stade de la combustion en phase gazeuse. Pourtant la vitesse de combustion et son degré d'achèvement sont fonction des réactions de combustion hétérogène. Non seulement la combustion dépend de la quantité de matières volatiles présentes, mais elle dépend aussi de la composition des produits de pyrolyse et en particulier des goudrons. Par conséquent, la quantité de matières volatiles n'est pas la seule propriété importante en ce qui concerne la combustibilité et il faut envisager autre chose pour évaluer les charbons en vue de l'injection.

NOUVEAUX ASPECTS DE L'ÉVALUATION DES CHARBONS POUR L'INJECTION

Plusieurs facteurs influent sur la combustibilité des charbons. Les résultats trouvés dans la littérature montrent que le rendement en goudrons est important pour évaluer les charbons que l'on envisage d'injecter dans des hauts fourneaux.

COMBUSTION, FORMATION DE GOUDRONS ET DE SUIE

Les caractéristiques importantes des charbons à injecter dans les hauts fourneaux sont : la teneur en hydrogène, la teneur en matières volatiles, la teneur en cendres, la composition des cendres, la température de fusion des cendres, la teneur en eau, la teneur en soufre et en phosphore, la teneur en alcalis et la quantité de goudrons dans les produits de pyrolyse. L'influence de constituants comme l'hydrogène, les cendres, l'humidité, les alcalis et le soufre sur le rendement global du haut fourneau est bien connue. Cependant, les propriétés du charbon qui influent sur la combustibilité sont aussi de grande importance, en raison notamment de la brièveté du temps de séjour des particules et du faible rapport stoechiométrique pour la combustion aux taux d'injection élevés dans le système porte-vent, tuyère et cavité (Fig. 60).

Selon le critère le plus communément accepté par les concepteurs et les exploitants de hauts fourneaux, plus la teneur du charbon en matières volatiles est élevée (30-40 %) plus la combustion est efficace. C'est un point de vue que l'on retrouve dans de nombreuses publications (20, 34, 43, 68). Nous doutons que ce seul critère soit suffisant pour caractériser la combustibilité des charbons dans les hauts fourneaux, et nous estimons qu'il faut envisager aussi la quantité de goudrons produite. La combustion des charbons à haute teneur en matières volatiles est nettement plus rapide que celle des autres charbons pendant la première phase, car ils dégagent rapidement de grandes quantités de matières combustibles. Ce dégagement rapide signifie qu'une plus grande partie de la combustion s'effectue dans le porte-vent, entraînant une augmentation marquée de la température des gaz dans celui-ci (voir Fig. 54). Toutefois, d'autres expériences ont montré que la température des particules de charbons à faible teneur en produits volatiles pouvait dépasser celle des charbons à haute teneur au voisinage de l'extrémité du porte-vent, ce qui tendrait à faire croire que la combustion hétérogène est le facteur dominant lorsque le processus avance (voir Fig. 60) (97). De plus, la figure 54 montre que le degré final de combustion d'un charbon à faible teneur en matières volatiles (NP, 15,9 %) est d'environ 70 %, ce qui est comparable aux 72 % des charbons à haute teneur en matières volatiles (ECN, 30,9 %) et confirme que la combustion du charbon dans les hauts fourneaux dépend de la combustion hétérogène.

Les résultats obtenus par différentes personnes (88, 91, 106) indiquent que la quantité de goudrons produite est fonction de la teneur en matières volatiles. Les quantités de goudrons et d'huiles légères produites selon l'essai de pyrolyse de Fischer sont données à la figure 61 (108) pour différents charbons. Le maximum est obtenu avec les charbons bitumineux à haute teneur en matières volatiles. Les expériences de Loison et Chauvin (88), faites à 1 100°C (la température du vent) indiquent également que ce sont les charbons à plus forte teneur en matières volatiles qui produisent le plus de goudrons (Fig. 62) (64). En général, la quantité de goudrons et leur composition dépendent de la température de réaction, du temps de séjour, du type de charbon, du mode de chauffage et de l'environnement immédiat (présence de certains produits minéraux ou d'une atmosphère gazeuse). Le dégagement dans le porte-vent et la tuyère se fait très rapidement, ce qui a pour effet d'augmenter la production de goudrons et le rapport C/H (107). Les goudrons produits par pyrolyse des charbons forment de la suie pendant la combustion. On a estimé que dans la plage 1 600-2 000°C presque un tiers de la masse des matières volatiles est transformée en suie (108). Les particules de charbon qui constituent la suie ressemblent un peu à du graphite, elles sont formées de sphères ou de chaînes qui, à haute température, deviennent une source de rayonnement lumineux

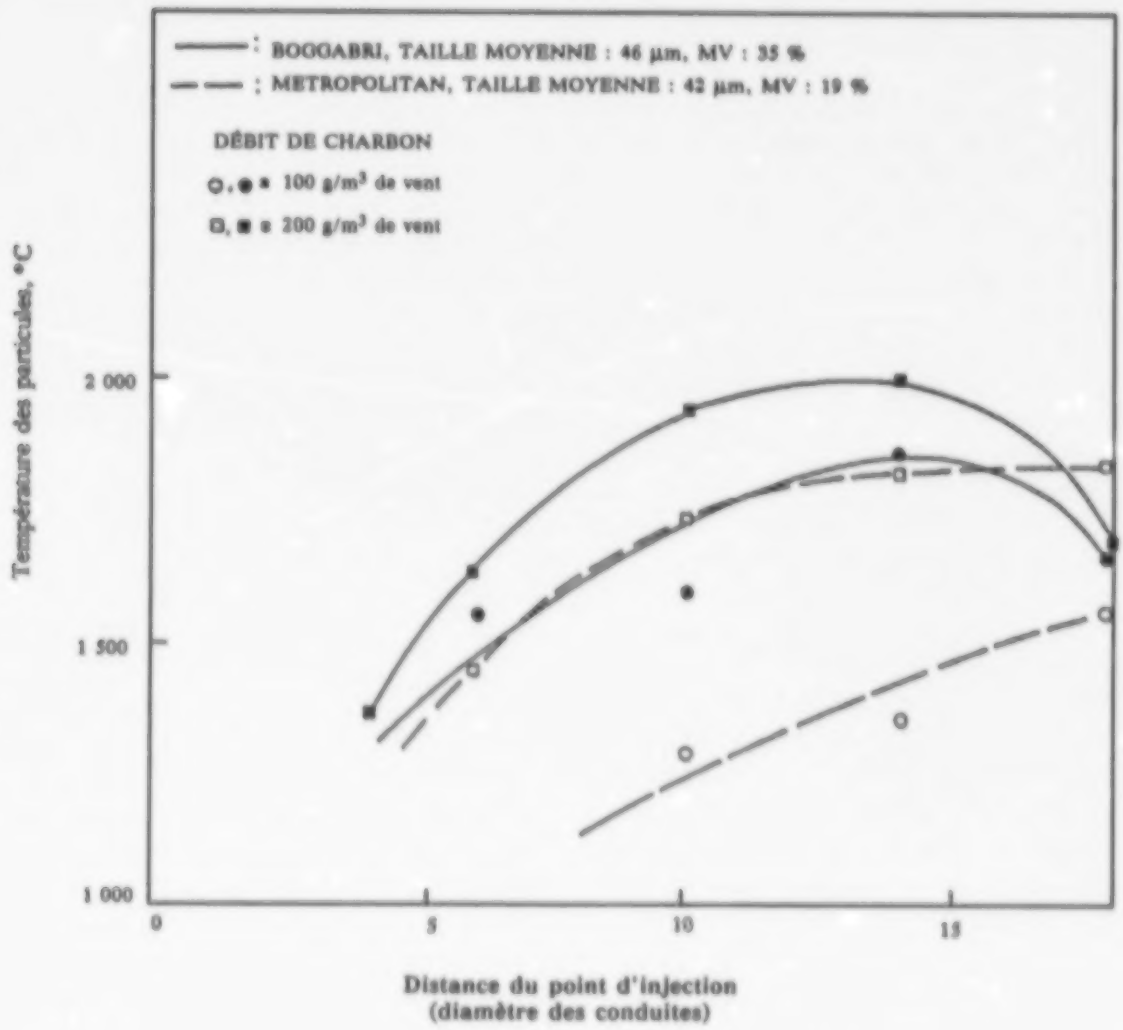


Fig. 60 – Caractéristiques de combustion de charbons à moyenne et haute teneur en matières volatiles

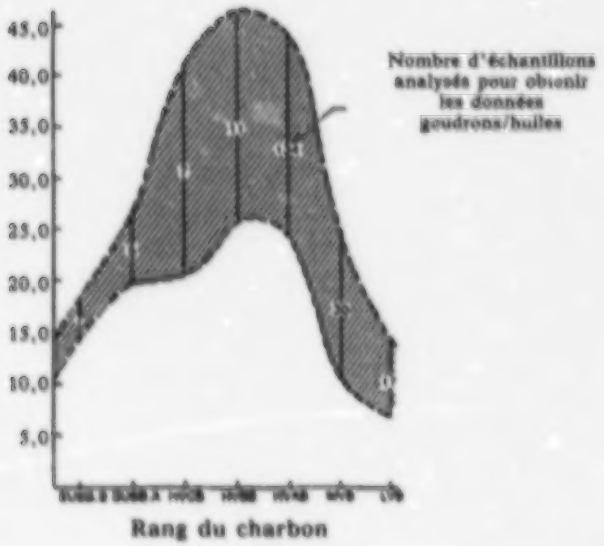


Fig. 61 – Influence du type de charbon sur la production de goudrons (essai de Fischer)

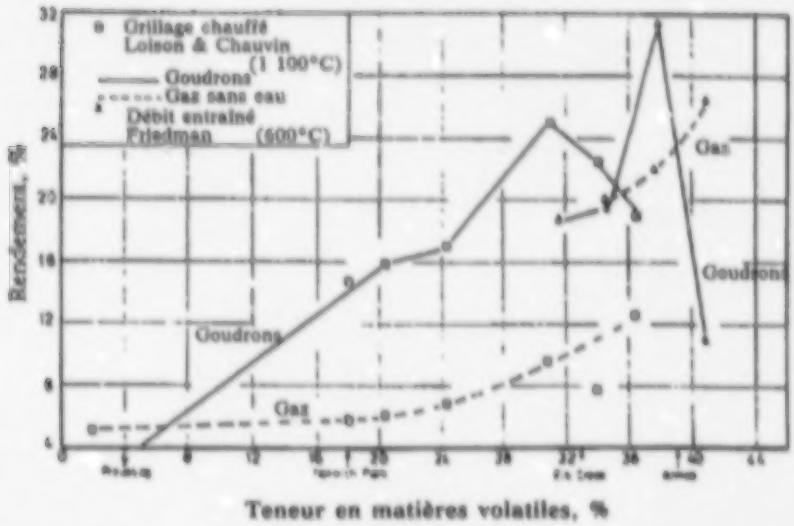


Fig. 62 – Produits de pyrolyse en fonction de la teneur en matière volatiles (d'après l'analyse immédiate)

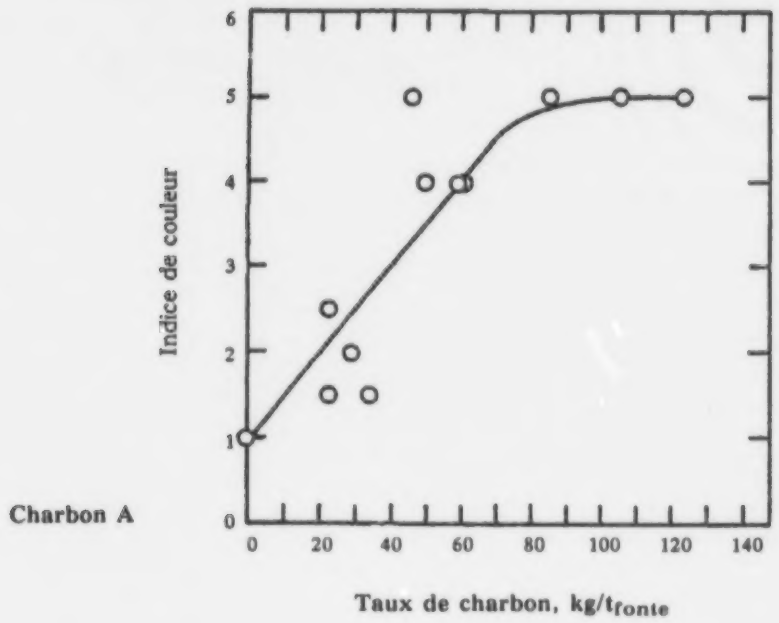
(109). Beer, lors d'une étude des flammes froides, a observé que le rayonnement de la flamme des charbons bitumineux pulvérisés était plus intense que celle des anthracites pulvérisés, ce qui confirme indirectement les résultats de la figure 40, à savoir que les charbons à haute teneur en matières volatiles forment plus de goudrons et donc plus de suie (110).

Les goudrons et la suie ne sont pas souhaitables dans les hauts fourneaux. La suie n'est pas très poreuse et ne possède pas suffisamment de surface interne pour permettre les réactions hétérogènes. De ce fait, elle est moins réactive que la matière carbonisée (84) et sa combustion complète demande un rapport air/combustible élevé et un temps de séjour assez long, des conditions qui n'existent pas dans le haut fourneau. La formation de suie peut entraîner une augmentation de la quantité de combustible consommée et de nombreux problèmes de fonctionnement comme un blocage de la cavité, une diminution de la perméabilité de la charge, une mauvaise diffusion de la chaleur dans la masse et un accrochage de la charge.

Récemment, la Kawasaki Steel Corporation a effectué une série de recherches sur la combustion en utilisant une nouvelle sonde installée dans le haut fourneau n° 5 des aciéries de Chiba (99). L'efficacité de la combustion a été déterminée en classant les échantillons selon cinq indices de couleur. Les échantillons étaient prélevés dans la cavité d'un haut fourneau en fonctionnement et mesurés. L'indice 1 représentait une couleur grise venant d'un prélèvement dans un haut fourneau sans ICP et l'indice 5 la couleur foncé de la poudre de graphite. La figure 63 montre qu'en augmentant le taux d'injection, le charbon B (22,8 % de matières volatiles) produisait moins de changement d'indice que le charbon A (34,3 % de MV). Ainsi, à un taux d'injection de 60 kg/t_{fonte}, les charbons A et B donnaient des indices de 4 et 2, respectivement, ce qui prouve qu'il y avait plus de carbone imbrûlé dans la cavité avec le charbon A. On ne peut relier le pourcentage de charbon brûlé à la teneur en matières volatiles, mais on peut sans doute le relier à la teneur en goudrons, le charbon A en produisant davantage (donc plus de suie) comme le montrent les figures 61 et 62. Les résultats de la figure 63 et d'autres études (64-66, 88, 106, 111-114) indiquent qualitativement qu'une faible production de goudrons et un haut rapport stoechiométrique sont les principaux facteurs qui influent sur l'efficacité de la combustion. Ces résultats laissent entendre que la production de goudrons doit être prise en considération dans toute évaluation d'un charbon en vue de son injection dans un haut fourneau. Par conséquent, la connaissance de la seule teneur en matières volatiles ne suffit pas à caractériser la combustibilité d'un charbon pour les besoins de l'utilisation dans un haut fourneau.

CONCLUSIONS ET RECOMMANDATIONS

Il faut considérer la production de goudrons dans toute procédure de sélection d'un charbon pour l'injection dans un haut fourneau, car c'est un facteur qui influe sur l'efficacité de la combustion, particulièrement à un faible rapport stoechiométrique, en produisant de la suie qui a une plus mauvaise combustibilité que les produits de carbonisation. Les réactions hétérogènes déterminent davantage le pourcentage de charbon finalement brûlé que les réactions en phase gazeuse qui se produisent plus tôt dans le système porte-vent, tuyère et cavité.



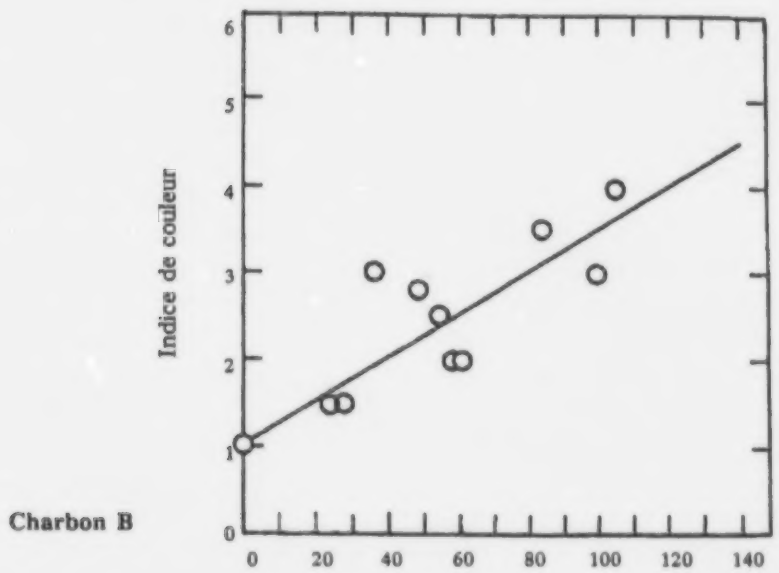


Fig. 63 – Effet du taux de charbon injecté sur l'efficacité de la combustion pour deux types de charbon ayant des teneurs différentes en matières volatiles

Les charbons à forte teneur en matières volatiles peuvent produire de grandes quantités de goudrons. Les charbons à faible teneur en matières volatiles, produisant donc peu de goudrons, pourraient convenir parfaitement à l'injection dans les hauts fourneaux. Les charbons à faible teneur en MV ont un rapport C/H plus élevé et donc un meilleur rapport de remplacement du coke. Actuellement, on néglige peut-être de bons charbons à faible ou moyenne teneur en MV, parce que l'évaluation de la combustibilité est faite seulement en fonction de la teneur en matières volatiles.

Il faudrait envisager des méthodes pour réduire la production de goudrons pendant l'injection. Il faudrait, notamment, étudier l'influence de l'oxyde de calcium sur les produits de pyrolyse et l'efficacité de la combustion dans les conditions du haut fourneau, car on a montré qu'il augmentait notablement la production d'hydrocarbures gazeux, d'hydrogène et de monoxyde de carbone, tout en réduisant la production de liquides (107, 115, 166).

D'autres études, dans les conditions des hauts fourneaux, devraient être faites pour décrire quantitativement l'influence de la production de goudrons sur l'efficacité de la combustion pour des charbons de rang et de teneur en cendres différents. De plus, pour mieux comprendre et optimiser le processus il faudrait mieux connaître la combustion des matières carbonisées dans le système porte-vent, tuyère et cavité.

ÉVALUATION DES CHARBONS CANADIENS POUR L'INJECTION

Les réserves canadiennes de charbon sont évaluées à 65×10^9 t, dont la moitié environ de type bitumineux (2), principalement dans les Rocheuses et les contreforts de l'Alberta et de la Colombie-Britannique. Cela représente environ 10 % des réserves mondiales. Les données sur la production et les exportations canadiennes pour 1985 et 1986 sont présentées à l'Annexe A, Tableau A-2 (117).

Le Canada dispose d'une grande variété de charbons, aux teneurs variables en cendres et en matières volatiles, qui conviendraient à l'injection dans des hauts fourneaux. Nous avons choisi pour étude quelques charbons typiques. (Les Tableaux A-3 (118), A-4, A-5 et A-6 (119) contiennent des données sur des anthracites, des charbons bitumineux, des charbons sous-bitumineux et des lignites, respectivement.)

ANTHRACITE

L'anthracite canadien (mont Klappan, Colombie-Britannique) a une faible teneur en hydrogène (2,02 %) et donc un rapport C/H (44,0) plus élevé que les anthracites dont fait état le Bureau of Mines des États-Unis (30,0) (24). Comme il n'aurait pas un gros effet refroidisseur sur la TRAC, il pourrait être utile au fonctionnement du haut fourneau et permettre des taux d'injection élevés. Selon Ridgion et Cordier (voir Fig. 43) (24), avec un anthracite comme celui du mont Klappan on pourrait en injecter 15 kg pour 300 m^3 d'air pour compenser une augmentation de 100°C de la température du vent et maintenir la TRAC constante. L'expérience industrielle (9-12, 28) confirme l'intérêt de l'anthracite pour l'injection.

CHARBONS BITUMINEUX

Teneur en matières volatiles Comme nous l'avons vu, les MV influent directement sur la combustion du charbon et indirectement sur le système porte-vent, tuyère et cavité. La production de goudrons peut être considérée comme un effet indirect des MV. Théoriquement, les charbons à faible teneur en MV peuvent être injectés en plus grandes quantités. La figure 64 (82) montre l'influence des MV sur la consommation de coke et la production de métal, d'après un modèle du bilan des matières et du bilan thermique. On suppose une teneur en cendres constante de 7 %.

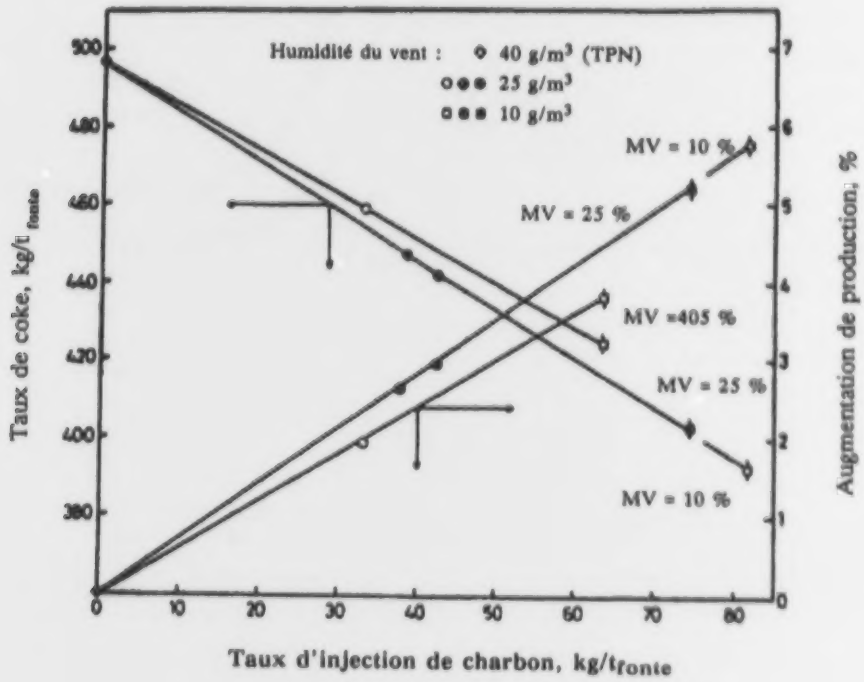


Fig. 64 – Effet de la teneur en matières volatiles sur le taux d'injection et la productivité

Il faut observer deux choses importantes : a) l'injection d'un charbon à haute teneur en matières volatiles est moins favorable à la consommation du coke et à la production de fonte; et b) ayant un effet refroidisseur moindre, les charbons à 10–20 % peuvent être injectés en plus grande quantité, économisant ainsi plus de coke et augmentant la production.

La plupart des charbons bitumineux canadiens contiennent 20–27 % de MV, mais certains peuvent atteindre 30 % et même 37 % (voir Annexe A, Tableau A–4). Bien que beaucoup de sidérurgistes préfèrent les charbons à haute teneur en MV, certains (99) ont constaté que les charbons à teneur moyenne conviennent mieux, car ils brûlent plus complètement. Comme nous le disions plus tôt cela vient du fait que les charbons plus gras produisent plus de goudrons.

Une autre étude fait état des avantages des charbons à faible et moyenne teneur en matières volatiles en ce qui concerne le rapport de remplacement du coke (voir Fig. 18) (31).

Teneur en cendres On considère habituellement que 10 % est la limite supérieure tolérable pour les charbons à injecter dans les hauts fourneaux.

Les charbons bitumineux canadiens ont des teneurs en cendres comprises habituellement entre 2,88 et 10,91 %, quelques-uns atteignant toutefois 11,32 %, 12,7 % et 17,32 % (voir Annexe A, Tableau A-4). De plus, les charbons canadiens ont une faible teneur en alcalis, voisine de la limite inférieure de la fourchette courante (1-4 %). Cette caractéristique est particulièrement importante en raison des effets des alcalis sur les revêtements réfractaires.

Teneur en soufre Bien que la désulfuration dans le haut fourneau ne soit pas un problème, une haute teneur en soufre a des incidences défavorables sur le fonctionnement. Les charbons canadiens ont des teneurs en soufre comprises entre 0,19 et 1,72 % (voir Tableau 4). Ce niveau garantit une faible teneur en soufre de la fonte sans les frais supplémentaires qu'occasionnerait une augmentation du volume de laitier.

Humidité Comme nous l'avons dit, selon des données japonaises (23), l'humidité de constitution influe sur l'humidité du charbon pulvérisé (voir Fig. 45). La très faible humidité de constitution des charbons canadiens (0,63-1,72 %), sauf pour un type (voir Annexe A, Tableau A-5), garantit une faible teneur en humidité du charbon pulvérisé, ce qui est particulièrement important pour le transport et la distribution pneumatique.

Facilité de broyage La facilité de broyage des charbons canadiens est très bonne (44-94) (voir Annexe A, Tableau A-4) comparée aux autres charbons (habituellement 10 à 40). Ce facteur est avantageux pour la préparation du charbon pulvérisé pour l'injection.

CHARBONS SOUS-BITUMINEUX

Les charbons sous-bitumineux contiennent beaucoup de matières volatiles (35-40 %), peu de cendres (6,30-11,30 %) et peu de soufre (0,22-0,62 %) (voir Annexe A, Tableau A-5). De plus, ils ont des teneurs relativement élevées en oxyde de calcium dans les cendres, ce qui peut être utile pour la formation du laitier. Leur forte teneur en matières volatiles peut être utile, surtout qu'ils produisent peu de goudrons pendant la pyrolyse, comparés aux charbons bitumineux à forte teneur en MV (voir Fig. 61). Par conséquent, la forte teneur en matières volatiles et la faible quantité de goudrons produits peuvent représenter une caractéristique intéressantes du point de la combustion dans le haut fourneau. Les données sur la combustion en haut fourneau expérimental sont peu nombreuses et il faudrait faire des recherches sur les caractéristiques de combustion de ces charbons.

LIGNITES

Une expérience grandeur réelle aux aciéries ARBED-Belval (Luxembourg) (61) a prouvé que ce type de combustible pouvait être injecté. Le résultat a été très favorable et la productivité a été bonne comparativement à celle obtenue avec les charbons durs. On n'a observé aucune perturbation importante du processus de combustion.

D'après les résultats obtenus au Luxembourg, on peut dire que les lignites canadiens (voir Annexe A, Tableau A-6) pourraient être utilisés pour l'injection dans les hauts fourneaux.

FACTEURS FAVORISANT L'INJECTION DE CHARBON, CONCLUSIONS, ANALYSE DES COÛTS

Le haut fourneau est le stade de la production de l'acier qui exige le plus d'énergie, puisqu'il peut représenter jusqu'à 80 % de son énergie de production (120). Pour un haut fourneau donné, l'énergie requise est une fonction de la conception, des propriétés de la charge et des paramètres de fonctionnement. Le coke est la principale source d'énergie, mais il est coûteux. De plus, on prévoit une pénurie, ce qui augmentera encore son prix (120). L'injection de combustible auxiliaire permet de diminuer la quantité de coke nécessaire.

Les facteurs influant sur le choix d'un combustible injectable sont :

- les caractéristiques du haut fourneau, notamment la quantité de vent et sa température;
- le coût et la disponibilité du coke par rapport à ceux du combustible auxiliaire; et
- les investissements et les frais d'exploitation exigés par le système d'injection.

De tous les combustibles fossiles, le charbon est celui qui est le plus commun, pour lequel il y a le plus de réserves et qui est le meilleur marché comparé au coke et aux autres combustibles utilisables.

Les avantages du charbon sur les autres combustibles sont la disponibilité, le prix, les réserves, la qualité, les avantages techniques et les économies.

Disponibilité et prix Il y a du charbon adapté à l'injection dans pratiquement toutes les parties du monde. Au niveau international, les approvisionnements en charbon ne sont pas aussi limités et aussi soumis aux aléas politiques que les produits pétroliers. Le Canada a d'énormes gisements (10 % des réserves mondiales) de charbons de toutes qualités, utilisables pour l'injection dans des hauts fourneaux.

Réserves Par rapport aux autres combustibles fossiles, le charbon est très abondant et peut être considéré comme le combustible du futur. Les réserves connues devraient être suffisantes pour les siècles à venir, alors que le pétrole et le gaz naturel pourraient durer moins d'un siècle.

Qualités acceptables Divers types de charbons (des lignites aux anthracites) ont été injectés avec succès (voir Tableau 1).

Avantages technologiques

a) L'injection de charbon déplace le processus de réduction vers la réduction indirecte.
b) Le taux le plus élevé de réduction indirecte (59 %) se produit à l'injection au taux le plus bas de réduction directe (34 %), comparé à l'injection de pétrole et au fonctionnement au coke seulement (voir Fig. 10).

c) Le taux de la réaction de la régénération du CO est le plus faible pour l'injection de charbon (voir Fig. 14), ce qui diminue les besoins thermiques pour obtenir une quantité donnée de fonte.
d) La baisse du taux de la réaction de régénération du CO est censée diminuer l'affaiblissement du coke causé par cette réaction et donc améliorer la perméabilité de la charge.
e) L'injection de charbon est importante pour contrôler le bilan thermique dans la zone de combustion.
f) Le charbon a le rapport C/H le plus élevé de tous les combustibles auxiliaires, et donc l'effet refroidisseur le plus faible (voir Fig. 15).
g) Le charbon peut être injecté en plus grande quantité que les autres combustibles, tout en conservant une TRAC optimale (voir Fig. 13, 14 et 43).
h) En raison du taux d'injection plus élevé possible, le charbon a un rapport de remplacement du coke plus élevé que le pétrole et le gaz naturel (voir Fig. 20 et 65) (21).
i) Selon des considérations théoriques et des expériences grandeur réelle, le charbon peut remplacer 30 à 40 % du coke sans conséquences négatives pour le fonctionnement (voir Annexe A, Tableau A-7).
j) Selon les données disponibles (voir Annexe A, Tableau A-7), la diminution de la quantité de coke est :
   - en moyenne de 15 %;
   - la plus élevée avec l'anthracite (38 %, aciéries de Shoudu, Chine);
   - de 7,4 % pour le lignite; et
   - de 8,6 % pour le charbon granulaire.
k) En réduisant la quantité de coke dans la charge, la quantité de matériaux contenant du fer augmente, ce qui améliore la productivité du haut fourneau (voir Annexe A, Tableau A-7).
l) Selon les données disponibles (voir Annexe A, Tableau A-7), la productivité augmente :
   - de 8,7 %, en moyenne;
   - de 30 %, la plus élevée (Shoudu Steel Corp., Chine);
   - de 7,4 % pour le lignite; et
   - de 16,7% pour le charbon granulaire.

Économies Le remplacement de plus grandes quantités de coke, en raison des économies qu'il fait réaliser, est un élément majeur de la réduction des frais de production. Le montant des économies réalisées dépend des conditions locales, c'est-à-dire de l'usine de coke, du prix et de la disponibilité du coke et du charbon, ainsi que du marché éventuel pour les gaz de fours à coke.

Les tableaux 7 et 8 (120) montrent les économies réalisables par injection de charbon, selon l'expérience d'ARMCO. Le tableau 7 illustre les économies lorsque le charbon remplace le coke et le tableau 8 lorsqu'il remplace le pétrole. Dans les deux cas on ne tient pas compte des immobilisations requises.

Voici les économies réalisées : 5,68 $ US/t_{fonte} par rapport au fonctionnement au coke uniquement (voir Tableau 7) et 10,18 $ US/t_{fonte} par rapport à l'utilisation de pétrole (voir Tableau 8).

Tableau 7 – Économies par tonne de fonte lorsque l'injection de charbon remplace le coke

Hypothèses :	
• Capacité du haut fourneau	5 000 t/d (1 750 000 t/a)
• Taux de combustible	500 kg/t_{fonte}
• Cendres du coke	9 %
• Cendres du charbon	6 %
• Coût du combustible : coke charbon	120 $/t* 60 $/t
• Coût de l'injection	8 $/t
• Rapport de remplacement	20 %
Calculs :	
Rapport de remplacement	R = 1,48 – 0,666 (6 % de cendres de charbon)/(9 % de cendre de coke), donc R = 1,04 kg de coke conservé/kg charbon injecté
Charbon injecté	500 kg/t_{fonte} x 0,20 = 100 kg/t_{fonte}
Coke remplacé	100 x 1,04 (R) = 104 kg/t_{fonte}
Coke utilisé	500 kg/t_{fonte} – 104 kg/t_{fonte} = 396 kg/t_{fonte}
Coût du combustible au coke seulement	500 x 120 $/t = 60 $/$t_{fonte}$
Coût du combustible avec injection de charbon	396 x 120 $/t = 47,52 $/$t_{fonte}$ 100 kg charbon à (60 $ + 8)/t = 6,80 $/$t_{fonte}$
Coût total du combustible	54,32 $/$t_{fonte}$
Économies totales	60 $ – 54,32 $ = 5,68 $/$t_{fonte}$

*Tous les prix sont en dollars US.

Tableau 8 – Économies par tonne de fonte lorsque l'injection de charbon remplace l'injection de pétrole

Hypothèses identiques au tableau 7 plus :	
• Usage initial de combustible	coke : 420 kg/t_{fonte} pétrole : 67 kg/t_{fonte}
• Coût du pétrole	230 $/t
• Rapport de remplacement du pétrole	1,2 (kg de coke économisé par kg de pétrole injecté)
Calculs :	
Rapports de remplacement	Pétrole : 1,2 kg coke conservé pour /kg de pétrole injecté Charbon (cendre 6 %) : 1,04 kg coke conservé/kg de charbon injecté
Charbon nécessaire pour remplacer 67 kg/t de pétrole	67 kg/t x 1,2/1,04 = 77 kg/t
Coût du pétrole injecté	67 kg à 230 $/t = 15,41 $/$t_{fonte}$
Coût du charbon injecté	77 kg à (60 $ + 8 $) $/t = 5,23 $/$t_{fonte}$
Économies totales	15,41 $ – 5,23 $ = 10,18 $/$t_{fonte}$

*Tous les prix sont en dollars US.

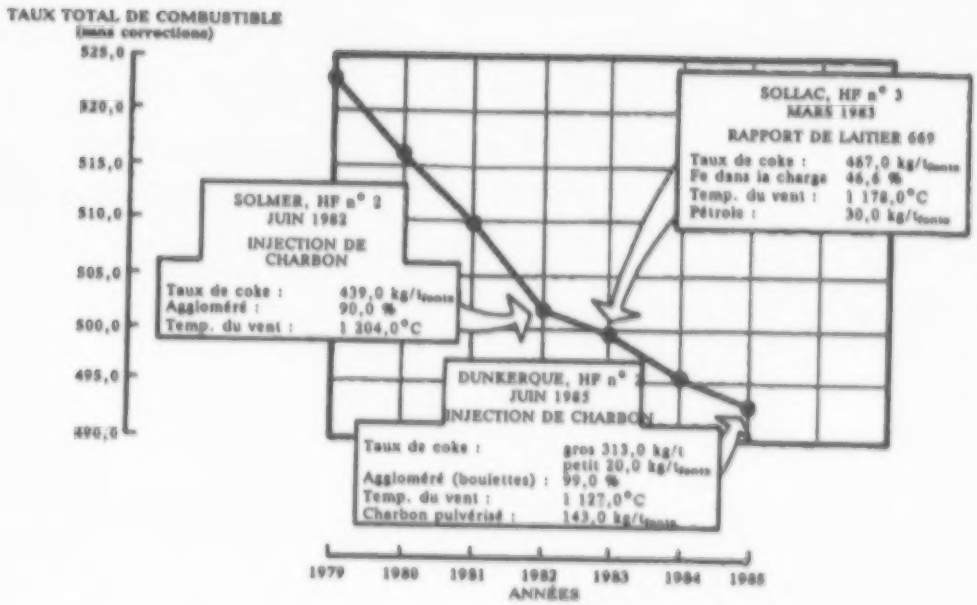


Fig. 65 – Évolution du taux de combustible en France

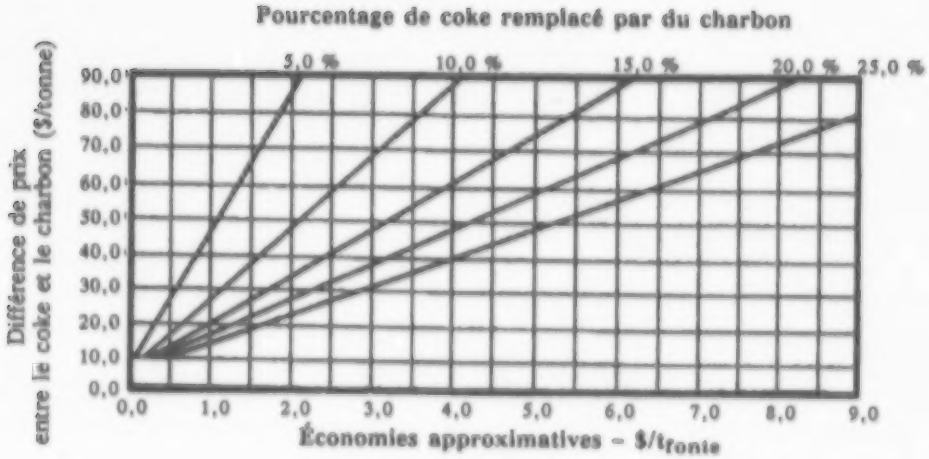


Fig. 66 – Économies résultant du remplacement du coke par du charbon

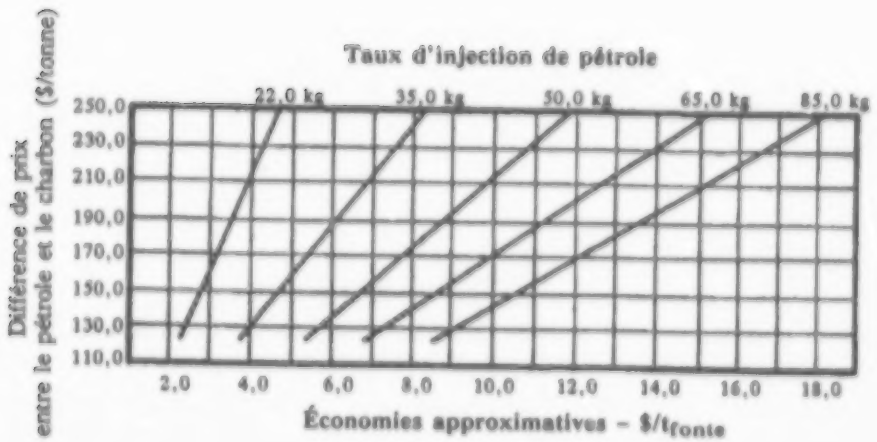


Fig. 67 – Économies résultant du remplacement du pétrole par du charbon

Pour un haut fourneau hypothétique produisant 2 000 tonnes de fonte par jour, les économies sont de 4 146 000 $US par rapport à l'utilisation de coke seulement et 7 431 400 $US lorsque le charbon remplace le pétrole. En dollars canadiens cela donne 5 339 000 $ et 9 660 820 $, respectivement.

Ces économies ne prennent pas en considération l'amélioration de la productivité et la stabilisation du fonctionnement.

Elles sont illustrées graphiquement aux figures 66 et 67 (120) pour le remplacement du coke et du pétrole, respectivement. Il y a deux hypothèses : a) 1 kg de charbon remplace 1 kg de coke; et b) 1,2 kg de charbon remplace 1 kg de pétrole.

Keenan et Morrison chiffrent les économies à environ 3 $US/$t_{fonte}$ lorsque le charbon remplace le pétrole et ont calculé une période de récupération de 3,8 années (122).

Selon une autre source (48), les économies seraient de 9 DM/t_{fonte} lorsque le charbon injecté remplace le coke. La période de récupération serait de 30, 17 et 13 mois pour des taux d'injection de 55, 80 et 100 kg/t_{fonte}, respectivement.

Frais de construction Les frais de construction d'un système typique d'injection de 20 tonnes de charbon pulvérisé à l'heure sont les suivants (ARMCO - Babcock & Wilcox (Amanda)) (25) :

	(M $US)	%
Traitement du charbon brut	1,2	8
Broyage et stockage	5,0	33
Système d'injection	4,0	27
Annexes	2,5	17
Commandes	2,3	15
Total	15,0	100

Systèmes mécaniques Des systèmes pneumatiques nouvellement mis au point (1, 40, 48) permettent un contrôle efficace de la distribution et de l'injection de charbon à chacune des tuyères, ce qui est particulièrement important lorsque la pression varie dans le système porte-vent, tuyère et cavité.

BESOINS DE RECHERCHE

Bien que la technologie de l'injection du charbon soit maintenant bien établie, il existe de nombreux problèmes qui justifieraient des recherches, notamment au niveau de la combustion. Pour mieux comprendre et optimiser les principaux facteurs qui influent sur l'injection de charbon et le fonctionnement du haut fourneau, il faudrait faire des recherches dans cinq domaines essentiels.

MODÉLISATION INFORMATIQUE ET SIMULATION DU PROCESSUS

Raisons Le fonctionnement d'un haut fourneau, notamment avec injection de charbon, met en jeu un ensemble très complexe de réactions et de mécanismes où entrent de nombreuses variables. Les

facteurs importants sont : le type de charbon (MV, cendres), l'efficacité de la combustion du charbon, les conditions du vent, la température de la flamme, le taux d'injection du charbon (rapport stoechiométrique), la quantité de coke remplacée, le processus de réduction (régénération du CO, réduction indirecte), la composition des matériaux de la charge, et de celle de la fonte et du laitier.

Objectif L'objectif est de déterminer les conditions optimales de fonctionnement.

Méthodologie :

- méthode du bilan thermique et du bilan des matières;
- formulation d'équations simultanées pour le bilan des matières (Fe, C, O_2, H_2) et le bilan thermique (général, zone de combustion);
- utilisation de données canadiennes; et
- facteurs à considérer : taux de charbon, type de charbon, conditions du vent, taux de coke et processus de réduction.

CARACTÉRISTIQUES DE LA COMBUSTION DU CHARBON

D'autres études sont nécessaires sur l'influence des caractéristiques des charbons (MV, goudrons, suie) et des conditions de combustion sur l'efficacité de la combustion dans un haut fourneau.

Raisons Bien que des recherches aient été publiées, il n'y a pas suffisamment de données pour connaître les caractéristiques des charbons susceptibles de conduire à l'efficacité de combustion souhaitée. Pour y parvenir, trois études pourraient nous fournir des données sur toutes les étapes de la combustion.

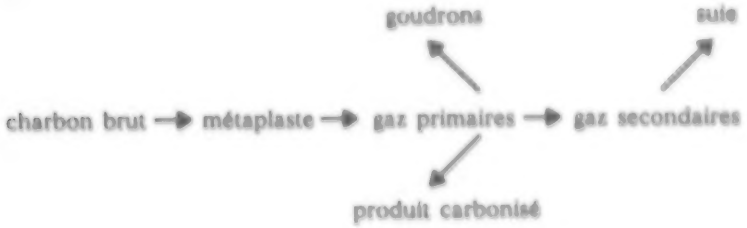
Étude de la cinétique de la pyrolyse des charbons

Raisons Il n'y a pas suffisamment de données sur la pyrolyse dans les conditions du haut fourneau.

Objectifs :

- déterminer la quantité de goudrons produits d'après les caractéristiques du charbon; et
- déterminer l'influence des minéraux sur le dégagement des produits de pyrolyse (goudrons) et l'influence de ceux-ci sur le pourcentage consumé.

Méthodologie On suppose que la pyrolyse s'effectue selon le modèle de Chermin et van Krevelen (83) :



Les expériences en laboratoire se feraient à des températures comprises entre 1 000 et 1 300 °C et à des vitesses de chauffe de 10^0 à 10^6 °C/s.

Étude de la combustion du charbon en phases gazeuse et hétérogène

Raisons On manque de données sur l'influence des MV et des goudrons sur le pourcentage de charbon brûlé dans le système porte-vent, tuyère et cavité et il n'y a pas de données quantitatives sur la formation de suie qui influence pourtant la quantité brûlée.

Objectifs :
- déterminer l'influence des produits de pyrolyse (MV, goudrons) sur la combustion;
- établir le mécanisme de formation de la suie, les caractéristiques de combustion de celle-ci et son influence sur le pourcentage de charbon brûlé; et
- déterminer l'influence de l'emplacement du point d'injection et du mode de mélange sur l'efficacité de la combustion et le dépôt de cendres, selon le type de charbon.

Méthodologie Expériences en chambre de combustion simulant l'environnement d'un haut fourneau :
- température du vent : 1 000 à 1 300°C;
- vitesse du vent : 150 à 300 m/s;
- rapport stoechiométrique : 1,0 à 2,5; et
- enrichissement en oxygène : 21 à 25 %.

Étude de la combustion dans le système porte-vent, tuyère, cavité

Objectifs :
- confirmer les résultats des études en laboratoire; et
- établir des critères pour l'évaluation et la sélection des charbons propres à l'injection dans un haut fourneau.

Méthodologie :
- essais dans un haut fourneau en fonctionnement en injectant du charbon dans une seule tuyère.

COMBUSTION DES CHARBONS GRANULAIRES ET PULVÉRISÉS

Raisons Jusqu'à présent, on ne sait pas avec précision s'il vaut mieux injecter du charbon pulvérisé ou granulaire.

Objectif :
- trouver une version supérieure de l'injection de charbon.

Méthodologie Expériences en laboratoire et considérations théoriques portant également sur l'analyse économique.

COMPORTEMENT DU COKE PENDANT L'INJECTION DE CHARBON

Raisons On suppose, sans en avoir la preuve, que l'injection de charbon réduit l'affaiblissement du coke.

Objectifs :

- établir une relation entre la réaction de régénération du CO et la dégradation du coke; et
- déterminer les propriétés requises du coke lorsque l'on injecte du charbon.

Méthodologie L'analyse théorique serait combinée à des expériences dans des conditions simulées.

CARACTÉRISTIQUES DE COMBUSTION DES CHARBONS CANADIENS

Raisons On manque de données, et l'utilisation de l'injection de charbon par les principaux clients du Canada est en augmentation (70 % pour le Japon de 1985 à 1986).

Objectifs :

- caractériser la combustibilité des charbons canadiens (anthracites, bitumineux, sous-bitumineux et lignites); et
- accroître la compétitivité des charbons canadiens par rapport aux autres, en obtenant des données complètes sur les clients.

RÉFÉRENCES

1. Tanaka, K., Tamada, S., Yukubo, Y., et Motonaga, K. "Technical development of pulverized coal injection (PCI) and blast furnace performance"; KOBELCO Technical Report, *R&D Kobe Steel Engineering Reports* 34:4:1–8; Oct. 1984.

2. Foster, R.J., et Morgan, A. "Coal for the steel industry"; *Ironmaking Steelmaking* 10:5:201–204; 1983.

3. Voice, E.M., et Ridgion, J.M. "Changes in ironmaking technology in relation to availability of coking coals"; *Ironmaking Steelmaking (Publication trimestrielle)* 1:2–7; 1974.

4. Japan watching – "Use of pulverized coal injection in blast furnaces increased by 70%"; *Iron & Steel Maker* 8; Juillet 1987.

5. Loginov, V.I. "Injection of powdered coal into blast furnace hearth"; *Stal* 16:8:675–682; 1956; (en russe).

6. Voskobolnikov, V.G., et Mikhalevich, A.G. "Ways of further reducing coke consumption in blast furnaces"; *Stal* 7:612–615; Juillet 1969; (en anglais).

7. Wolf, P.L., et Lowry, H.H. "Coal injection in an experimental blast furnace"; *Ironmaking Proceedings* 25:217–220; 1966.

8. Strassburger, J.H., Ostrowski, E.J., et Dietz, J.R. "Solid fuel injection at Hanna Furnace Corporation"; *Proceedings, Blast Furnace, Coke Oven and Raw Materials*, du 9 au 11 avril 1962; 21:157–181; 1962.

9. Cordier, J., Guerbois, J., Hazard, P., Malvaux, R., et Reveil, C.H. "Les injections au haut fourneau"; *Rev Metall* (Paris) 791–810; Oct. 1962.

10. Chauzat, P., Reveil, C., Cordier, J., Damge, A., et Leclerc, J.C. "Injection pneumatique de charbons secs au haut fourneau n° 2 de la C^{ie} des Hauts Fourneaux de Chasse"; *Rev Metall* (Paris) 60:1:39–48; Janvier 1963.

11. Summers, E.M., MacNaughton, L., et Monson, J.R. "Coal injection into No. 5 blast furnace at Stanton and Staveley Ltd."; Réunion générale annuelle 1963, Institute of Iron and Steel, *Journal Iron and Steel Institute* 666–692; Août 1963.

12. Wynn, A.H.A., et MacNaughton, L. "Injection of coal into blast furnaces"; *Proceedings, World Power Conference*, Lausanne, 7:1:2294–2320; Sept. 1964.

13. Ostrowski, E.J., et Dietz, J.R. "Blast furnace operations with injected coal at Weirton"; *J Met* 1289–1291; Déc. 1965.

14. Bell, S.A., Pugh, J.L., et Snyder, B.J. "Coal injection–Bellefonte furnace"; *Ironmaking Proc* 180–185; 1967.

15. Bocong, G., Shengming, W., et Zongda, O. "Coal powder injection on blast furnace of Shoudu Iron and Steel Co."; *Ironmaking Steelmaking* 10:3:109–113; 1983.

16. Peacey, J.G., et Davenport, W.G. *The Iron Blast Furnace; Theory and Practice*; Pergamon Press, Toronto–New York; 1979.

17. Strassburger, J.H. (éditeur). *Blast Furnace; Theory and Practice* v. 1, 2, Gordon and Breach Science Publ., New York; 1969.

18. Sakurai, H., Takahashi, H., et Suemori, A. "Injection of coal as auxiliary blast furnace fuel"; *Ironmaking Steelmaking* 10:3:137–142; 1983.

19. Rapport anonyme. "KOBELCO pulverized coal injection system"; *Conférence METEC 84*, Dusseldorf; 1:7; Juin 1984.

20. Uenaka, T., Tamura, S., Kuwano, K., Yabata, T., et Noma, F. "Pulverized coal injection (PCI) in a blast furnace"; *Proceedings, 44th Ironmaking AIME Conference*, Détroit, Avril 1985; 44:417–424; 1985.

21. McCarthy, M.J., Mathieson, J.G., Nomura, S., et Rogers, H. "Combustion of pulverized Australian coals under simulated blast furnace conditions"; *Proceedings International Conference on Coal Science*, Sydney, 1985; 423–426; 1985.

22. Meyer, H.W. "Discussion of the future of ironmaking in the blast furnace"; Rapport spécial de l'*Iron and Steel Institute* 72:186–187; 1962.

23. Wakuri, S., Mochizuki, S., Baba, M., Misawa, J., et Anan, K. "Operation of pulverized coal injection into a large blast furnace with high top pressure"; *Transactions Iron and Steel Institute of Japan* 2:622–630; 1984.

24. Doherty, J.D., et Griffen, J. "Coal injection into the iron blast furnace"; Island Creek Coal Sales Co., Huntington, WV, *Report*; 1964.

25. Sexton, J.R., et Wennerstom, J.M. "Blast furnace coal injection: long proven, now economical"; *Iron and Steel Engineer* 38–41; Janvier 1983.

26. Hatano, M., Miyazaki, T., Shimoda, T., Kajiwara, Y., et Kamei, Y. "Basic study of the utilization of new commercial fuels by using an experimental blast furnace"; *Proceedings Blast Furnace Conference He 80*, Arles, Juin 1980; II–2:II2.1–II2.16; 1980.

27. Burgess, J.M. "The potential of coal as a blast furnace fuel injectant"; *Broken Hill Pty Technical Bulletin* 23:66:69; Nov. 1979.

28. Bocong, G., Shengming, W., et Zongda, O. "Coal powder injection on blast furnace of Shoudu Iron and Steel Co."; 5th International Iron and Steel Congress, Washington, Avril 1986; *Proceedings 45th Ironmaking Conference* 45:501–504; 1986.

29. Fletcher, L.N., et Garbee, A.K. "Coal for blast furnace injection"; *Proceedings Symposium on Energy Use and Conservation in the Metals Industries*, New York, 1975; 203–217; editors Y.A. Chang et al.; 1975.

30. Hegui, D. "Theoretical calculation of replacement ratio of injecting pulverized coal in blast furnace"; Northeast University of Technology, *China Report*.

31. "Reduced coke consumption in the blast furnace through coal injection"; *Steel Times* 213:12:585, 588, 599; Déc. 1985.

32. Tate, M. *Tetsu-to-Hagane* 58:566; 1972.

33. "Behaviour of coke in furnace"; *Ironmaking Steelmaking* 6:4-5; 1980.

34. Reintjes, H., et Tamura, S. "Injection and combustion of coal in a blast furnace"; *Iron and Steel Engineer* 33-37; Fév. 1983.

35. Hemming, C.M., et Carter, G.C. "Coal injection systems for blast furnaces"; *Ironmaking Steelmaking* 3:104-113; 1981.

36. Summers, E.M. "Engineering and design considerations of coal injection"; *Proceedings Ironmaking Conference*, Pittsburgh, Avril; 23:69-95; 1964.

37. Nishida, T., et Tamura, S. "Development of pulverized coal injection into blast furnace"; *Proceedings 107th Meeting Iron and Steel Institute of Japan*, Avril 1984; Conférence n° S.34, B-245; 1984.

38. Strassburger, J.H., Ostrowski, E.J., et Dietz, J.R. "Solid fuel injection at the Hanna Furnace Corp."; *Proceedings AIME Conference on Blast Furnace, Coke Oven and Raw Materials* 21:157-181; 1962.

39. Dietz, J.R. "Solid fuel injection at Weirton"; *J Met* 499; Juillet 1963.

40. Saino, M., Yoshimoto, M., Serizawa. Y., Akimoto, E., Sakaguchi, T., et Watanabe, Y. "New pulverized coal injection system for Chiba No. 5 blast furnace"; *Proceedings, 44th Ironmaking Conference*, Detroit, Avril 1985; 44:463-472; 1985.

41. Saino, M., Okumura, K., Ikeda, Y., Minakawa, T., Takeda, K., et Sakaguchi, Y. "Multi-purpose injection system at Chiba Works' No. 5 blast furnace"; *Iron & Steelmaker* 13:10:20-26; Oct. 1986.

42. Long, L.C., et Garbee, A.K. "Pulverized coal injection in blast furnace at ARMCO"; *Proceedings, Second Annual Symposium on Coal Utilization*, Charleston, S.C., Avril 1980; 1-11; 1980.

43. Koen, W., Vogel, R.B., Toxopens, H.L., et Flierman, G.A. "Injection of coal into the Hoogovens blast furnaces"; *Proceedings, 44th Ironmaking Conference*, Détroit, Avril 1985; 44:437-447; 1985.

44. Bell, S.A., Pugh, J.L., et Sexton, J.R. "ARMCO coal injection"; Rapport *ARMCO*.

45. Garbee, A.K., et Pugh, J.L. "Coal injection at ARMCO"; in *The Future of the World's Steel Industry*; editor J. Szekely; Marcel Dekker, New York-Basel; 55-64; 1974.

46. Wakuri, S., Baba, M., et Kanamori, K. "Pulverized coal injection into No. 1 blast furnace at Oita Works, Nippon Steel Corp."; *Ironmaking Steelmaking* 10:3:98–103; 1983.

47. Eichinger, F., Sorger, H., et Grosz, R.K. "Kohlecinblasen in den hochofen"; *Fachberichte Huttenpraxis Metallweiterverarbeitung* 23:10:822–827; 1985.

48. Eichinger, F.T., Nolde, H.D., Grosz, R.K., et Sorger, H. "Coal injection into blast furnaces; application of K–BFI process at blast furnace No. 2, SSAB, Lulea"; 5th International Iron and Steel Congress, Washington, Avril 1986; *Proceedings 45th Ironmaking Conference* 45:485–494; 1986.

49. Limbach, R., Liesh, J., et Koster, J. "Nouveau concept pour l'injection de combustibles solides au haut fourneau"; *Rev Mettal* (Paris) 487–494; Juin 1982.

50. Koster, J., Limbach, R., Ulveling, L., et Peters, S. "Lignite/coal injection in a blast furnace at Arbed Esh–Belval Works"; *Iron and Steel Engineer* 41–44; Mars 1983.

51. Grafeuille, F., Allair, B., et Lao, D. "Coal injection in Usinor Dunkirk BF 2"; *Proceedings, 44th Ironmaking Conference*, Détroit, Avril 1985; 44:449–461; 1985.

52. Allaire, B., Grafeuille, F., et Lao, D. "Injection de charbon sur le haut fourneau 2 d'Usinor Dunkerque"; *Rev Metall* (Paris) 789–799; Nov. 1985.

53. Maldonado, R., Hanniker, G., et Pettifor, M. "Granular coal injection into blast furnaces at Scunthorpe Works of the British Steel Corp."; *Proceedings, 44th Ironmaking Conference*, Détroit, Avril 1985; 44:425–435; 1985.

54. Maldonado, R., Hanniker, G., et Pettifor, M. "Résultats d'injection de charbon granulé aux hauts fourneaux de Scunthorpe de la British Steel Corp."; *Rev Metall* (Paris) 667–677; Août–Sept. 1985.

55. Yarmal, A.A., Yaroshevskii, S.L., Ruzhinskii, L.R., Suplin, L.Z., et Ryabenko, A.I. "Coal–dust injection into the blast furnace hearth", *Stal* 9:788–792; 1976; (en anglais).

56. Panev, G.A., Kuzub, A.G., Krasavtsev, I.N.; et al. "Injecting coal dust into a blast furnace"; *Metallurgist* 5:285–289; 1970.

57. Niekrasov, Z.I., Lupko, L.D., Wolodnik, A.W., et al. "Injection of pulverized fuel into the blast furnace hearth at Zaporozstal Works"; *Nauchnyie Trudy Instituta Chernoi Metalurgii, Dnepropetrovsk* 33:72–77; 1971; (en russe).

58. Yaroshevskii, S.L., Ryabenko, A.I., Antonov, A.A., Plotkin, Z.Sh., Krasavtsev, I.N., et Yarmal, A.A. "Application of pulverized coal for production of iron"; ("Primienienje pyleugolnovo topliva dla vyplavki cuguna") Kiev, Technika, 1974; (en russe).

59. Speight, J.G. *The Chemistry and Technology of Coal*; Marcel Dekker, New York; 1983.

60. Akberdin, A.A., Arkhipov, B.V., Belousov, I.P., et al. "Experimental industrial injection of coal dust into the hearth of a large blast furnace"; *Stal* 9:683–686; Sept. 1966; (en anglais).

61. Koster, J., et Limbach, R. "ARBED-Wurth PCIA system at ARBED-Belval with two different coal qualities"; *Ironmaking Steelmaking* 10:3:104-108; 1983.

62. Ridgion, J.M. "Blast furnace performance with injection at the tuyères"; *Annual General Meeting of the Iron and Steel Institute*, Londres, Mai 1961; Communication IM/C/31/61; 1-9.

63. Cordier, J. "Injection de charbon au haut fourneau"; *Rev Metall* (Paris) 491-494, Juin 1962.

64. Bortz, S., et Flament, G. "Experiments on pulverized coal combustion under conditions simulating blast furnace environments"; *Ironmaking Steelmaking* 10:5:222-229; 1983.

65. Seeker, W.R., Samuelsen, G.S., Heap, M.D., et Trolinger, J.D. "The thermal decomposition of pulverized coal particles"; *Proceedings, 18th Symposium on Combustion* (International), Pittsburgh, 1981; 1213-1226; 1981.

66. McLean, W.J., Hardesty, D.R., et Pohl, J.H. "Direct observations of devolatilizating pulverized coal particles in a combustion environment"; *Proceedings, 18th Symposium on Combustion* (International), Pittsburgh, 1981; 1239-1248; 1981.

67. Yaroshevskii, S.L., Brusov, L.P., Yarmal, A.A., Stepanov, V.V., et Skladanovskii, E.N. "Optimality and effectiveness of blast furnace operating regimes using pulverized coal"; *Stal* 8:12-16; 1985; (en anglais).

68. Ostrowski, E.J. "Factors influencing optimization of blast furnace coal injection"; *Ironmaking Steelmaking* 10:5:215-221; 1983.

69. Taggart, I.J., McCarthy, M.J., et Burgess, J.M. "Replacement of premium fuels by coal injection at the blast furnace"; *Broken Hill Pty Technical Bulletin* 26:1:76-79; 1982.

70. Kanayama, H., Seki, Y., Sait, T., Maekawa, M., Narita, K., et Tamura, S. "Influence of pulverized coal injection on raceway phenomena in the blast furnace"; *Proceedings 104th Meeting Iron and Steel Institute of Japan*, Sept. 1983; Conférence n° S763, B-153; 1983.

71. Hatano, M., Hiraoka, B., Fukuda, M., et Masuite, T. "Analysis of the combustion zone in the experimental blast furnace"; *Transactions Iron and Steel Institute of Japan* 17:102-109; 1977.

72. Hao, L. "Combustion of anthracites and low grade bituminous coals"; *Proceedings, International Conference on Coal Science*, Pittsburgh, Août 1983; 561-564; 1983.

73. Andronov, V.N., et Plotkin, Z.Sh. "Combustion of coal dust in the blast furnace hearth"; *Stal* 7:587-589; Juillet 1974; (en anglais).

74. Bortz, S. "Coal injection into the blast furnace"; Commission of the European Communities; Technical Steel Research Contract No. 7210. A A/601; *Rapport final*; 1983.

75. Yang Yong-Yi; Yang Yen-Hui; Yang Nai-Fi; Ku-Fei; et Yin Tar-Nin. "Recherches sur la cinétique de combustion du charbon pulvérisé dans le haut fourneau"; *Rev Metall* (Paris), 501-513; 1985.

76. Wakimoto, H., Sato, K., Fujiura, M., et Hara, H. "Combustion characteristics of pulverized coal in pressurized state"; *105th Meeting Iron and Steel Institute of Japan*, Avril 1983; Conférence n° S105.

77. Narita, K., Maekawa, M., Kanayama, H., Seki, Y., et Saito, T. *99th Meeting Iron and Steel Institute of Japan*, Avril 1980, Conférence n° S64.

78. Burgess, J.M., Jamaluddin, A.S., McCarthy, M.J., et al. "Pulverized coal ignition and combustion in the blast furnace tuyère zone"; *Proceedings, Joint Symposium of the Iron and Steel Institute of Japan and Australasian Institute of Mining and Metallurgy*, Tokyo, Oct. 1983; 129-141; 1983.

79. Jamaluddin, A.S., Wall, T.F., et Truelove, J.S. "Mathematical modeling of combustion in blast furnace raceways including injection of pulverized coal"; *Ironmaking Steelmaking*, 13:2:91-99; 1986.

80. Nomura, S., et McCarthy, M.J. "Theoretical study on combustion of injected pulverized coal in the blast furnace blowpipe"; *Transactions, Iron and Steel Institute of Japan* 26:10:875-883; 1986.

81. Fukutake, T., et Okabe, K. "Conditions for scale-up for the raceway size of cold model to that of blast furnace and combustion models"; *99th Meeting Iron and Steel Institute of Japan*, Avril 1980; Conférence n° S62.

82. Mathieson, J.G., McCarthy, M.J., Scaife, P.H. "Coals for blast furnace injection - factors involved in selection"; *7th ICCR Conference*, Pretoria, Oct. 1985.

83. Serio, M.A., Hamblen, D.G., Markham, J.R., et Solomon, P.R. "Kinetics of volatile product evolution in coal pyrolysis: experiment and theory"; *Energy and Fuels* 1:2:138-152;1987.

84. Smoot, D.L., et Pratt, D.T. *Pulverized Coal Combustion and Gasification*; Plenum Press, New York; 1979.

85. Anthony, D.B., Howard, J.B., Hottel, H.C., et Meissner, H.P. "Rapid devolatilization of pulverized coal"; *Proceedings, 15th Symposium (International) on Combustion* 1303-1317; 1975.

86. Kimber, G.H., et Gray, M.O. "Rapid devolatilization of small coal particles"; *Combustion and Flame* 11:360-362; 1967.

87. Badzioch, S., et Hawksley, P.G.W. "Kinetics of thermal decomposition of pulverized coal particles"; *Ind Eng Chem Process Des Dev* 9:4:521-530; 1970.

88. Loison, R., et Chauvin, R. "Pyrolyse rapide du charbon"; *Chimie et Industrie* (Paris) 92:6:269-295; Déc. 1964.

89. Gudenau, H.W., Ariyama, T., Korthas, B., et Yang, T. "Kohlenstaubeinblasen in den hochofen"; *Stahl und Eisen* 105:4:211-220; 1985.

90. Kobayashi, H., Howard, J.B., et Sarofim, A.F. "Coal devolatilization at high temperature"; *Proceedings, 16th Symposium (International) on Combustion* 411–425; 1976.

91. Furimsky, E., Vancea, L., et Belanger, R. "Effect of coal rank on structure of tars from low-temperature pyrolysis of Canadian coals"; *Industrial and Engineering Chemistry Product Research and Development* 23:1:134–140; 1984.

92. Bogdandy, L. *Reduction of iron ores*; Springer–Verlag, New York; 1971.

93. Gumz, W. *Kurzes handbuch der brennstoff und fenerungstechnik*; Springer–Verlag, Berlin; 1962.

94. Howard, J.B., et Essenhigh, R.H. "Pyrolysis of coal particles in pulverized fuel flames"; *Ing Eng Chem Des Dev* 6:1:74–84; 1967.

95. Tanaka, K., Yabata, T., Tamada, S., Kuwano, K., et Tamura, S. "L'injection de charbon pulvérisé aux hauts fourneaux de Kobe Steel"; *Rev Metall* (Paris) 765–773; Oct. 1985.

96. Suzuki, T., et al. *Tetsu-to-Hagane* 68:11:S762; 1982.

97. Scaife, P.H., Mathieson, J.G., McCarthy, M.J., Rogers, R., et Nomura, S. "Replacement of oil by coal injection at the blast furnace"; Department of Resources and Energy, Canberra, Australie, *Rapport* NERDDP/EG/84/268.

98. Ariyama, T., Kodo, H., Nishio, H., Ono, Y., Yamada, Y., et Fukushima, K. "Combustion characteristics of pulverized coal injected into an experimental blast furnace; study of the combustion behaviour in the lower part of the blast furnace –I"; *Tetsu-to-Hagane* 71:4:83; 1985.

99. Takeda, K., Taguchi, S., Fukutake, T., Kato, H., et Nakai, T. "Probing blast furnace raceway zone by use of a newly developed tuyère probe"; Kawasaki Steel Corp., *Internal Report*, 1987.

100. Wakimoto et al. *Tetsu-to-Hagane* 70:12:S805; 1984.

101. Lee, G.K., et Whaley, H. "Modification of combustion and fly-ash characteristics by coal blending"; *Journal Institute Energy* 190–196; Déc. 1983.

102. Vleeskens, J.M. "Combustion efficiency and petrographic properties"; *Proceedings International Conference on Coal Science*, Pittsburgh, Août 1983; 599–602; 1983.

103. Nandi, B.N., Brown, T.D., et Lee, G.K. "Inert coal macerals in combustion"; *Fuel* 56:125–130; Avril 1977.

104. Shiboaka, M., Thomas, C.G., et Young, B.C. "The influence of rank and macerals composition on combustion of pulverized coal"; *Proceedings, International Conference on Coal Science*, Sydney, Oct. 1985; 665–668; 1985.

105. Ramsden, A.R., et Shiboaka, M. "Microscopic observation of burning coal particles"; *Proceedings Pulverized Coal Conference*, University of Newcastle, NSW, Australie, Août 1979, Communication L 6; 1979.

106. Friedman, L., Ran, E., et Eddinger, R.T. "Maximizing tar yields in transport reactors"; *Fuel* 27:2:149–152; 1968.

107. Khan, R.M. "Production of high quality liquid fuels from coal by mild pyrolysis of coal–lime mixtures"; *Fuel Science & Technology International* 2:2:185–231; 1987.

108. Morrison, G.F. "Understanding pulverized coal combustion"; *International Energy Agency Coal Research*, Londres, IC TIS/TR 34, Déc. 1986.

109. Tien, C.L., et Lee, S.C. "Flame radiation", *Prog Combust Sci Technol* 8:41–59; 1982.

110. Beer, J.M. *Combustion Technology; Some Modern Developments*; Academic Press, New York; 1974.

111. Olszak, F., Ciuba, Z., Machniewicz, J., Michalowski, M., et Zieba, A. *Thermal Processes in Open Hearth Furnace; (Praca i obliczenia cieplne piecow martenowskich)*; Slask, Katowice; 1964; (en polonais).

112. Hutny, W.P., et Karczewski, K. "The influence of heavy hydrocarbons addition to coke–oven gas on radiative properties of its flame in open hearth furnaces"; Institute of Metallurgy/Nowa Huta Steel Corp., Cracow, *Rapport interne*, 1970; (en polonais).

113. Hutny, W.P., et Karczewski, K. "Improvement of flame radiation in glass kiln"; Institute of Metallurgy, Cracow, *Rapport interne*, 1975; (en polonais).

114. Hutny, W.P., et Price, J.T. "Investigation of tar yield effect on coal burnout under blast furnace conditions"; ERL/CANMET (en cours).

115. Franklin, H.D., Peters, W.A., et Howard, J.D. "Mineral matter effects on the rapid pyrolysis of a bituminous coal. 1. Effect on yield of char, tar and light gaseous volatiles"; *Fuel* 61:2:155–160; f1982.

116. Hutny, W.P., et Price, J.T. "Study of CaO influence on coal pyrolysis products and burnout under conditions of blast furnace injection"; ERL/CANMET (en cours).

117. L'Association canadienne du charbon, *Coal Focus* 11:3:2; Mars 1987.

118. Seve, G. "Analysis of Mt. Klappan Anthracite"; Gulf Canada Resources Ltd.; Calgary, Alberta.

119. Bonnel, G.W., et Janke, L.C. "Répertoire des analyses des charbons commerciaux canadiens n° 6"; *Rapport* n° 85–11F de CANMET, Ottawa; Mars 1986.

120. Waxweiler, J.H. "Injection as a means of reducing blast furnace energy costs"; *Proceedings 16th Annual Conference*, Tokyo, Oct. 1982; *IISI Report*, 53–60; 1982.

121. Thiriou, C., Capelani, R., Flamion, D., et Nicolle, R. "Utilisation de l'instrumentation et de la modélisation mathématique dans l'exploitation des hauts fourneaux français"; *Rev Metall* (Paris) 247–262; Avril 1987.

122. Keenan, G.F., et Morrison, D.M. "A current look at pulverized coal injection for blast furnaces"; *Iron and Steel Engineer* 30-34; Oct. 1977.

123. Strassburger, J.H. "Experience with injection of coal"; *Blast Furnace and Steel Plant* 447-457; Juin 1963.

124. Ostrowski, E.J., et Dietz, J.R. "Use of coal as injected blast furnace fuel at Weirton Steel"; *Industrial Heat* 85-96; Jan. 1968.

125. Garbee, A.K. "Coal injection into the blast furnace tuyères"; *Proceedings Congress Haut Fourneau*, Arles, Juin 1980; H F 80;3:II-4-1 - II-4-14; 1980.

126. Guo Yun-zhi, et Liu Yu-cai. "Injection de poudre de charbon dans le haut fourneau"; *Rev Metall* (Paris) 841-851; Oct. 1980.

127. Emushintsev, V.V., Galemin, I.M., et Dunaev, N.E. "Production of steelmaking pig iron with different consumption of coal dust"; *Stal* 531-534; Juin 1969; (en anglais).

128. Colnot, B. "Injection de charbon pulvérisé aux tuyères du haut fourneau 3 d'Ucknange"; *Rev Metall* (Paris) 877-887; Nov. 1962.

129. "Coke substitution at Kawasaki Steel"; *Steel Times* 213:12:585,588,599; Déc. 1985.

130. Monson, J.R., et Gathergood, D.S. "Review of injection of coal into blast furnace tuyères"; *Ironmaking Steelmaking* 3:101-103; 1981.

131. Melcher, N.B., Mahan, W.M., et Woolf, P.L. "Principles of blast furnace fuel injection"; General Meeting Iron and Steel Institute, Londres, Nov. 1961; *Rapport spécial* "The future of ironmaking in the blast furnace"; Rapport n° 72; 47-52; 1961.

132. Bell, H.B., et Taylor, J. "Fuel additions and blast modifications in the blast furnace"; General Meeting Iron and Steel Institute, Londres, Nov. 1961; *Special Report* "The future of ironmaking in the blast furnace"; Rapport n° 72; 10-23; 1961.

133. Englund, E. "Coal injection in blast furnaces"; National Swedish Board for Technical Development, *Energy Technology* 3:6-9; Nov. 1981.

134. Wanot, J., Matlinski, W., et Kowalczuk, L. "Reduction of coke consumption by injection of natural gas along with the coal dust into the blast furnace hearth"; *Proceedings, 4th International Conference on Ironmaking*, Ostrawa; 244-255; 1970.

135. Fletcher, L.N. "Technical and economic aspects of coal injection at blast furnace tuyères"; *Industrial Heat* 8,9,27; Août 1981.

136. Fletcher, L.N. "ARMCO's pulverized coal injection"; *Proceedings, 12th Annual Meeting International Iron and Steel Institute*, Bruxelles, juin 1980; v. 2 Energy Related Matters, 181-195; Juin 1980.

137. Labee, C.J. "ARMCO uses pulverized coal injection at Ashland"; *Iron and Steel Engineer* 51-52; Août 1976.

138. Voskobolnikov, V.G., Dunaev, N.E., Zurakovskii, B.L., Mikhalevich, A.G., et Sleptsov, Zh.E. "Technological aspects of use in blast furnaces of fuel additions introduced into tuyère zones together with oxygen enriched blast"; *Stal* 10:888-896; Oct. 1980; (en anglais).

139. Loginov, V.I., et Bekhter, E.I. "Injection of pulverized coal fuel and influence of this factor on hearth heat and oxidizing zone"; *Stal* 2:1:261-263; Jan. 1972; (en anglais).

140. Yaroshevskii, S.L., Krasavtsev, I.N., Afanas'eva, Z.K. "Blast furnace operating technology with injection into the hearth of natural gas and 100-200 kg of coal dust fuel per tonne pig iron"; *Steel in the USSR* 6:298-301; 1976.

141. Yaroshevskii, S.L., Krasavtsev, I.N., Stepanov, V.V., Suplin, L.Z., et Afanas'eva, Z.K. "Materials and heat balances for blast furnace operation with injection of powdered coal and natural gas into the hearth"; *Stal* 11:979-982; 1976; (en anglais).

142. Yaroshevskii, S.L., Tereshenko, V.N., Nekhaev, G.E., Didevich, A.V., et Anufriev, O.K. "Influence of pulverized coal on temperature and chemical composition of pig iron"; *Stal* 5:328-331; Mai 1979; (en anglais).

143. Tate, M., Nakane, C., Kim, C.W., et Suzuki, K. "Experiments on powdered coal injection into 0,5 m^3 blast furnace"; *Testsu-to-Hagane Overseas* 5:3:180-186; Sept. 1965.

144. Motoshige, M., Shibuta, H., Koyama, A., Shinohara, H., Iba, T., et Kiya, M. "Pulverized coal injection test at Wakayama No. 4 BF of Sumitomo Metal Industries Ltd"; *105th Meeting Iron and Steel Institute of Japan*, Avril 1983; Conférence n° S 106.

145. Capelani, R., Schneider, M., et Staib, C. "Diversification des combustibles utilisables au haut fourneau"; *Rev Metall* (Paris) 73:10:653-673; Oct. 1976.

146. Lassat de Pressigny, Y., Truffant, E., et Colnot, B. "Expérience française d'utilisation de torches à plasma au haut fourneau"; *Rev Metall* (Paris) 271-278; Avril 1986.

147. Wolf, P.L. "Improved blast furnace operation"; *Proceedings Symposium Efficient Use of Fuel in the Metallurgical Industries*, Institute of Gas Technology, Chicago, Déc. 1974; 265-296; 1974.

148. Minsheng, Q., Yongkun, X., Yongyi, Y., Naifu, Y., Fei, G., et Daming, R. "Feasibility of a new blast furnace process of injecting coal at an ultra high rate and of partially recycling the top gas"; *Iron Steel* (China) 20:5:13-18; 1985.

ANNEXE A

ANALYSE DES CHARBONS
ET
DONNÉES SUR LES HAUTS FOURNEAUX

Tableau A–1 – Différences entre les systèmes d'injection de charbon Amanda et Bellefonte (ARMCO–Babcock & Wilcox)

Objet	Bellefonte	Amanda
Atmosphère du système	Recyclée, pauvre en O_2	Air non recyclé
Soufflante primaire	Haute pression (haute vitesse)	Basse pression (basse vitesse)
Décrochage du système (panne)	Perte de la moitié de la capacité	Pas de changement de taux pendant 5 h
Épuration des gaz évacués	Épurateurs humides	Filtres à sacs
Source d'air d'injection	Surpresseur sur soufflante principale	Compresseur distinct
Alimentation en charbon brut	Trémies, alimentation haute pression	Alimentation standard
Commande du taux d'injection	Vitesse d'alimentation du broyeur	Variation de la pression d'alimentation

Tableau A–2 – Production et exportation de charbons canadiens (1985, 1986)

	Production (millions de tonnes)					
	Métallurgique		Thermique		Total	
Province	1985	1986	1985	1986	1985	1986
Nouvelle–Écosse	0,4	0,4	2,4	2,5	2,8	2,9
Nouveau–Brunswick	–	–	0,6	0,5	0,6	0,5
Saskatchewan	–	–	9,7	8,3	9,7	8,3
Alberta	4,4	4,5	20,2	20,5	24,7	25,0
Colombie–Britannique	19,4	17,3	3,6	3,8	23,0	21,1
Total	24,2	22,2	36,5	35,6	60,8	57,8

	Exportations	
Produit	1985	1986
Métallurgique	22,4	21,6
Thermique	4,9	4,4
Total	27,3	26,0

Tableau A-3 – Caractéristiques de l'anthracite canadien

Compagnie/Gisement	Rang du charbon	Analyse quantitative approximative (sec)			Analyse élémentaire (sec)			Pouvoir calorifique (MJ/kg)	Eau de constitution	Indice de broyage	Analyse des cendres				FSI
Gulf Canada/ Mont Klappan (C.-B.)		Cendres	MV	CF	C	H	S. tot	C/H			SiO_2	Al_2O_3	CaO	Na_2O K_2O	
Grossier première qualité		5,73	6,27	88,00	88,39	2,02	0,47	32,63 / 43,80	0,79	39	48,09	26,95	6,06	3,26	–
Fines de charbon		7,00	6,85	86,15	86,28	2,71	0,51	32,11 / 31,84	0,86	41	53,52	25,93	4,35	3,02	–

MV = Matières volatiles
CF = Carbone fixé

Tableau A-4 – Caractéristiques des charbons bitumineux canadiens

Compagnie/Gisement	Rang du charbon	Analyse quantitative approximative (sec)			Analyse élémentaire (sec)			Pouvoir calorifique (MJ/kg)	Eau de constitution	Indice de broyage	Analyse des cendres				FSI
		Cendres	MV	CF	C	H	S. tot	C/H			SiO_2	Al_2O_3	CaO	Na_2O K_2O	
Luscar Ltd./ Coalspur (Alb.)	Bitum H T	11,32	33,09	55,59	70,05	4,48	0,28	27,78 / 15,6	–	44	58,28	18,73	6,63	1,53	–
Smokey River/(Alb.)	Bitum F T	7,12	17,46	75,42	84,98	4,28	0,45	33,83 / 19,8	0,71	94	53.31	28,08	3,99	1,90	4,5
Westar Min./ Crowsnest (Alb.)	Bitum M T	9,95	21,13	68,92	81,73	4,44	0,27	32,43 / 18,4	0,80	86	60,41	27,69	1,89	0,41	6,0
Crowsnest/ Elk Valley (C.-B.)	Bitum M T	17,32	20,62	62,06	71,20	3,78	0,37	28,35 / 18,8	1,32	77	60,02	30,12	0,90	0,96	1,5
Denison Mines/ Peace R. (C.-B.)	Bitum M T	12,75	23,09	64,16	75,82	4,05	0,37	30,13 / 18,7	1,30	78	60,05	22,29	3,90	1,96	1,0
Fording Coal / Elk Valley (C.-B.)	Bitum H T	6,26	30,17	63,57	80,58	4,84	0,60	33,11 / 16,6	1,16	92	52,16	27,61	3,31	0,73	7,5
Westar Min./ Elk Valley (C.-B.)	Bitum H T	6,43	27,39	66,18	81,64	4,68	0,47	33,23 / 17,4	1,06	92	52,97	29,40	3,05	0,83	7,0
Cardinal R./ Cadomin (Alb.)	Bitum M T	9,78	22,07	68,15	81,69	4,38	0,20	32,65 / 18,5	0,87	80	48,48	24,77	7,68	1,78	6,5
N. B. Coal/ Minto (N.-B.)	Bitum H T	3,01	36,47	60,52	82,36	5,26	1,49	35,19 / 15,6	1,25	60	26,40	16,79	1,24	1,50	8,0

Tableau A-4 (suite)

Compagnie/Gisement	Rang du charbon	Analyse quantitative approximative (sec)			Analyse élémentaire (sec)			Pouvoir calorifique (MJ/kg)	Eau de constitution	Indice de broyage	Analyse des cendres				FSI
		Cendres	MV	CF	C	H	S. tot	C/H			SiO_2	Al_2O_3	CaO	Na_2O K_2O	
Cape Breton/ Sydney (N.-É.)	Bitum H T	2,88	37,90	59,22	82,66	5,43	1,63	35,01 / 15,2	1,25	60	22,36	14,64	1,22	1,38	8,0
Seminco Inc./ (N.-É.)	Bitum H T	5,36	34,48	60,16	79,12	5,48	1,58	33,54 / 14,44	1,72	63	43,34	20,52	1,55	2,55	7,5
Gregg River/ (N.-É.)	Bitum H T	9,95	21,14	68,91	81,56	4,39	0,31	32,71 / 18,6	0,94	85	54,71	25,32	4,34	1,73	5,0

H T = Haute teneur en matières volatiles
M T = Moyenne teneur en matières volatiles
F T = Faible teneur en matières volatiles

Tableau A-5 - Caractéristiques des charbons sous-bitumineux canadiens

Compagnie/Gisement	Rang du charbon	Analyse quantitative approximative (sec)			Analyse élémentaire (sec)			Pouvoir calorifique (MJ/kg)	Eau de constitution	Indice de broyage	Analyse des cendres				FSI
		Cendres	MV	CF	C	H	S. tot	C/H			SiO_2	Al_2O_3	CaO	Na_2O K_2O	
Forestburg/ Battle R. (Alb.)	C	6,30	40,13	53,57	68,69	4,47	0,47	26,45 / 15,4	-	34	36,03	14,22	18,78	0,56	-
Manalta Coal/ Shearness (Alb.)	C	8,30	39,63	52,07	65,54	4,40	0,62	25,27 / 14,9	-	39	33,09	19,31	18,39	1,77	-
Manalta Coal/ Wabamun (Alb.)	C	11,30	36,76	52,44	64,35	4,03	0,21	24,59 / 16,0	-	42	44,10	23,27	14,74	4,04	-
Manalta Coal/ Wabamun (Alb.)	C	9,37	39,18	51,45	66,39	4,41	0,47	25,78 / 15,0	-	36	41,24	16,61	20,06	1,21	-
Forestburg/ Battle R. (Alb.)	C	7,41	38,69	53,90	67,10	4,50	0,49	25,87 / 14,9	-	34	41,79	15,38	15,10	4,73	-

Tableau A-6 – Caractéristiques des lignites canadiens

Compagnie/Gisement	Rang du charbon	Analyse quantitative approximative (sec)			Analyse élémentaire (sec)			Pouvoir calorifique (MJ/kg)	Eau de constitution	Indice de broyage	Analyse des cendres				FSI
		Cendres	MV	CF	C	H	S. tot	C/H			SiO_2	Al_2O_3	CaO	Na_2O K_2O	
Bienfait Coal/ Estevan (Sask.)	A	10,22	40,11	49,67	63,63	4,34	0,42	24,67 / 14,7	–	58	25,61	19,89	18,56	10,45	–
Manalta Coal/ Estevan (Sask.)	A	10,05	42,16	47,79	65,29	4,38	0,96	25,20 / 14,9	–	51	23,72	12,63	20,50	10,86	–
Manalta Coal/ Estevan (Sask.)	A	10,28	41,34	48,38	64,21	4,50	0,40	24,49 / 14,3	–	60	27,36	18,86	19,15	11,74	–

Tableau A-7 – Données sur l'utilisation de l'injection de charbon

Réf.	Aciérie	Dimension haut fourneau, m^3	Système d'injection	Charbon Type/ Gran.	Charbon M V	Charbon M C	Charbon Cendres	Charbon S	Taux charbon, kg/t_{fonte}	Taux coke, kg/t_{fonte}	Économie coke, %	Rapport remplacement	Temp. vent, °C	Débit vent, m^3/h	Taux production, t/d	Aug. produ., %	Basicité laitier	CO/CO_2
(8)	Hanna			pas d'injection					–	778	–	–	790	66 270	613		0,96	1,58
(123)	Furnace, National Steel Corp.	n° 2 464	Petrocarb	F T Pulv.	17,6	74,9	7,5	0,9	142	657	15,5	0,85	803	66 270	612	–	0,99	1,62
(8)	Hanna			pas d'injection					–	795	–	–	796	66 270	613		0,96	1,62
(123)	Furnace, National Steel Corp.	n° 2 464	Petrocarb	H T Pulv.	40,0	55,6	4,4	1,1	132	670	15,7	0,95	815	66 270	613	–	1,01	1,70
(13)	Weirton,			pas d'injection					–	620	–	–	983	123 322	1 619	–	1,18	1,47
(123)	National Steel Corp.	n° 3 1 332	Koppers	H T Pulv.	39,6	54,7	13,9	0,1	96	539	13,1	0,85	983	114 189	1 540	-4,9	1,12	1,54
(10)	Chase,			pas d'injection					–	710	–	–	750	–	162	–	1,08	0,43
(63)	France	n° 2 176		H T Pulv.	34,5	–	7,9	0,8	109	572	19,4	1,03	833	–	173	6,4	0,94	0,50
				F T Pulv.	6,6	–	9,3	0,6	132	550	22,5	1,00	837	–	212	24,0	1,01	0,53
(11)	Stanton			pas d'injection					–	782	–	–	850	47 580	461	–	1,26	3,38
(12)	and																	
(12)	Staveley, R.-U.	n° 5 543	Petrocarb	H T Pulv.	32,5	50,7	7,7	0,7	67	710	9,2	0,93	910	52 680	506	10,0	1,22	3,30
				H T Pulv.	35,4	52,2	5,7	1,5	74	710	9,2	1,02	950	52 680	507	10,0	1,22	3,12
(12)	Stanton			pas d'injection					–	920	–	–	850	51 000	320	–	1,25	3,07
(36)	and Staveley, R.-U.	n° 5 543	Petrocarb	anthr. Pulv.	7,1	83,0	8,7	0,81	135	790	14,0	1,00	815	51 000	396	12,6	1,23	2,77
(36)	Stanton			pas d'injection					–	920	–	–	830	54 360	446	–	1,27	3,07
	and Staveley, R.-U.	n° 5 543	Petrocarb	H T Pulv.	34,2	58,1	5,7	1,4	182	740	19,6	1,01	935	54 000	409	– 8,3	1,31	3,26

Tableau A-7 - (suite)

Réf.	Aciérie	Dimension haut fourneau, m^3	Système d'injection	Charbon Type/ Gran.	Charbon M V	Charbon M C	Charbon Cendres	Charbon S	Taux charbon, kg/t_{fonte}	Taux coke, kg/t_{fonte}	Économie coke, %	Rapport remplacement	Temp. vent, °C	Débit vent, m^3/h	Taux production, t/d	Aug. produ., %	Basicité laitier	CO/CO_2
(14)	Ashland	Bellefon. 1 488	B & W	HT Pulv.	37,0	57,4	5,6	0,7	132	439	-	0,78	931	164 401	2 093	-	1,14	-
				Pulv.	-	-	-	-	81	481	-	-	957	15 300	2 128	-	0,90	1,17
(125)	ARMCO	Amanda 2 039	B & W	HT Pulv.	35,5	61,0	3,5	0,7	85	486	-	-	884	225 480	3 361	-	0,90	1,13
(28)	Aciéries Shoudu Corp., Chine	1 034	Chinese	pas d'injection					-	587	-	-	1 022	75 600	2 037	-	1,06	-
				anthr. Pulv.	8,3	76,8	14,4	0,4	240	361	38,0	0,85	1 126	85 932	2 539	24,6	1,03	-
		576		pas d'injection					-	587	-	-	1 025	-	1 135	-	-	1,71
			Chinese	anthr. Pulv.	7,2	78,9	13,9	0,1	216	365	37,8	0,87	1 120	83 100	1 436	21,0	1,01	1,19
(60)	Karaganda URSS		Karaganda	pas d'injection					-	598	-	-	1 065	158 760	2 825	-	1,01	1,47
				FT Pulv.	18,0	-	32,9	1,1	61	561	6,2	0,63	1 074	157 423	2 797	-1,0	1,02	1,34
(67)	Doneck, URSS		Doneck	pas d'injection					n. gas 75,2 m^3 / 61 / 68 m^3ng	519	-	-	1 076	121 260	1 782	-	1,28	-
				-	-	-	-	-		455	-	0,67	1 062	119 940	1 841	-	1,29	-
(57)	Zarporozstal, URSS		Zarporozstal	pas d'injection					n. gas 79,6 m^3 / 21 / 81,5 m^3	512	-	-	1 141	142 800	2 126	-	1,22	1,64
				anthr. Pulv.	6,1	72,3	20,3	1,3		497	-	-	1 125	140 100	2 130	-	1,22	1,71
(50) (61)	ARBED - Belval, Luxembourg	A	ARBED-Wurth	pas d'injection					-	5 553	-	-	979	132 000	1 980	-	-	-
				lign. Pulv.	44,0	41,0	4,0	0,5	76	512	7,4	0,54	1 111	-	2 126	7,4	-	-
		1 376	ARBED-Wurth	FT Pulv.	12,0	73,0	13,5	1,0	53	506	8,5	0,81	1 132	-	2 111	6,2	-	-

Tableau A-7 – (suite)

Réf.	Aciérie	Dimension haut fourneau, m^3	Système d'injection	Charbon Type/ Gran.	Charbon M V	Charbon M C	Charbon Cendres	Charbon S	Taux charbon, kg/t_{fonte}	Taux coke, kg/t_{fonte}	Économie coke, %	Rapport remplacement	Temp. vent, °C	Débit vent, m^3/h	Taux production, t/d	Aug. produ., %	Basicité laitier	CO/CO_2
(23)	Oita			pas d'injection					–	469	–	–	1 281	322 183	7 068	–	–	–
(46)	Nippon St., Japon	n° 1 4 158	B & W	H T Pulv.	32,5	–	7,5	–	52	402	14,3	1,11	1 291	303 102	7 484	5,9	–	–
(20)	Kobawa			pas d'injection					–	491	–	–	1 098	–	7 068	–	–	–
(95)	Kobe St., Japon	n° 2 1 845	Petrocarb	–	–	–	–	–	50	400	10,4	0,91	1 113	–	6 950	–	–	–
(53)	Scunthorpe British Steel Corp.,	Victoria 1 473	B.S.C.	pas d'injection					–	514	–	–	885	127 917	2 346	–	0,93	–
				H T granul.	32,2	–	7,1	1,2	51	470	8,6	0,89	903	139 530	2 738	16,7	1,00	–
(54)	R.-U.	Queen Mary 1300	B.S.C.	pas d'injection					–	489	–	–	844	117 700	2 191	–	0,96	–
				H T granul.	–	–	3,5	1,5	28	454	7,1	0,89	884	119 483	2 337	6,7	0,96	–
(51) (52)	Usinor, France	n° 2 1 600	ARBED-Wurth	F T Pulv.	–	–	–	–	78	406	–	0,84	1 111	168 200	3 935	–	1,16	1,05
(128)	Ucknage, France	n° 3 710	Sprunck-Ucknage	pas d'injection					–	465	–	–	1 004	–	–	–	–	–
				H T Pulv.	31	–	7	–	55	408	12,2	0,85	1 006	–	–	–	–	–
(18)	Chiba	n° 5		pas d'injection					–	525	–	–	1 026	–	–	–	–	–
(129)	Kawasaki St., Japon	2 584	Kawasaki	H T Pulv.	34,2	55,9	9,9	0,6	24	497	5,3	0,91	997	–	–	–	–	–
(43)	Hoogovens Ijnuiden,	n° 6 2 400	B & W	pas d'injection					–	533	–	–	1 022	260 820	4 543	–	–	1,09
				H T Pulv.	33,6	–	5,7	0,8	90	416	21,9	0,87	1 105	247 452	4 628	1,0	–	1,08
	P.-B.	n° 7 3 520		pas d'injection					–	491	–	–	1 114	339 840	7 114	–	–	1,03
				H T Pulv.	33,6	–	5,1	0,8	80	414	15,7	0,83	1 231	345 060	7 002	-1,9	–	1,04
(46) (47)	Svenska St., Luléa, Suède	n° 2 1 235	Klockner	pas d'injection					–	464	–	–	–	–	3 334	–	0,95	–
				M T Pulv.	26,5	–	8,7	0,5	67	398	14,2	1,00	–	–	3 828	14,8	0,92	–